



Universidad  
Carlos III de Madrid

PROYECTO FIN DE CARRERA

# **ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO VERTICAL DE UN VEHÍCULO FERROVIARIO CON AMORTIGUADORES MAGNETORREOLÓGICOS**

Ingeniería Industrial: especialidad Mecánica

Departamento de Ingeniería Mecánica

2016

AUTOR: D. Alberto Sierra Conde

TUTOR: Dra. Dña. María Jesús López Boada

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	7
1.2 OBJETIVOS.....	8
1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	8
<b>2. LA SUSPENSIÓN .....</b>	<b>10</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	10
2.2 COMPONENTES DE UNA SUSPENSIÓN .....	12
2.2.1 ELEMENTOS ELÁSTICOS .....	12
2.2.2 ELEMENTOS AMORTIGUADORES .....	16
2.3 TIPOS DE SUSPENSIONES MONTADAS EN VEHICULOS FERROVIARIOS .....	21
2.3.1 TREN PENDULAR X2000 .....	21
2.3.2 TREN PENDULAR DE TALGO .....	22
2.3.3 FIAT PENDOLINO .....	23
2.3.4 CAF: TECNOLOGÍA SIBI.....	24
2.4 TIPOS DE SUSPENSIONES .....	25
2.4.1 SUSPENSIONES PASIVAS .....	25
2.4.2 SUSPENSIONES SEMI-ACTIVAS .....	26
2.4.3 SUSPENSIONES ACTIVAS .....	27
<b>3. AMORTIGUADORES MAGNETORREOLOGICOS .....</b>	<b>29</b>
3.1 FLUIDOS MAGNETORREOLOGICOS .....	29
3.1.1 REOLOGÍA.....	29
3.1.2 INTRODUCCIÓN A LOS FLUIDOS MAGNETORREOLOGICOS (FMR) .....	31
3.2.3 COMPORTAMIENTO FRENTE A UN CAMPO MAGNÉTICO .....	32
3.2 AMORTIGUADOR MAGNETORREOLOGICO .....	34
3.3 OTRA APLICACIONES DE LOS FMR .....	35
3.4 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS FMR .....	36
<b>4. MODELOS DE AMORTIGUADORES MR .....</b>	<b>38</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	38
4.2 MODELO GENERAL DE BOUC-WEN .....	39
4.3 MODELO DE KWOK.....	41

4.4 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS EN LAS SIMULACIONES DEL VEHÍCULO FERROVIARIO CON SIMPACK .....	42
<b>5. ALGORITMOS GENÉTICOS.....</b>	<b>44</b>
5.1 INTRODUCCIÓN .....	44
5.2 EL ALGORITMO GÉNÉTICO SIMPLE .....	45
5.2.1 CODIFICACIÓN .....	46
5.3 POBLACIÓN .....	49
5.3.1 TAMAÑO DE LA POBLACIÓN .....	49
5.3.2 TAMAÑO INICIAL .....	49
5.4 FUNCIÓN OBJETIVO .....	49
5.5 SELECCION .....	51
5.6 CRUCE .....	52
5.7 MUTACIÓN .....	53
5.8 REDUCCIÓN .....	54
<b>6. MODELADO DEL VEHÍCULO FERROVIARIO CON SIMPACK.....</b>	<b>55</b>
<b>7. RESULTADOS DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>60</b>
<b>8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>71</b>
8.1 CONCLUSIONES .....	71
8.2 TRABAJOS FUTUROS .....	72
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>73</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 - (a) Suspensión primaria (b) Suspensión secundaria</i>	11
<i>Figura 2.2 - Ballesta de suspensión</i>	12
<i>Figura 2.3 - Muelles helicoidales (secciones: redonda, cuadrada y ovalada)</i>	13
<i>Figura 2.4 - Barra de torsión</i>	14
<i>Figura 2.5 - Resorte neumático</i>	15
<i>Figura 2.6 - Amortiguador hidráulico</i>	17
<i>Figura 2.7 - Amortiguador hidráulico con válvula</i>	17
<i>Figura 2.8 - Gráfica del amortiguamiento de Coulomb</i>	18
<i>Figura 2.9 - Suspensión de Coulomb</i>	19
<i>Figura 2.10 - Amortiguador magnético</i>	20
<i>Figura 2.11 – Sistema pendular X2000</i>	21
<i>Figura 2.12 - Sistema pendular de Talgo</i>	22
<i>Figura 2.13 – Sistema del Fiat Pendolino</i>	23
<i>Figura 2.14 – Sistema de la tecnología SIBI</i>	24
<i>Figura 2.15 - Esquema suspensión pasiva para una rueda</i>	25
<i>Figura 2.16 - Esquema suspensión semi-activa para una rueda</i>	26
<i>Figura 2.17 - Esquema de una suspensión activa para una rueda</i>	27
<i>Figura 2.18 - Comparación entre suspensión pasiva y activa</i>	28
<i>Figura 3.1 - Curva de esfuerzos-deformaciones general</i>	29
<i>Figura 3.2 - Anisotropía óptica inducida por un campo magnético</i>	31
<i>Figura 3.3 - Comportamiento de un FMR en presencia de un campo magnético</i>	33
<i>Figura 3.4 - Curva característica de los FMR</i>	33
<i>Figura 3.5 - Fluido magnetorreológico</i>	34
<i>Figura 3.6 - Amortiguador magnetorreológico</i>	35

<i>Figura 4.1 - Representación del modelo general de Bouc-Wen</i>	39
<i>Figura 4.2 - Representación del modelo de Bouc-Wen modificado</i>	40
<i>Figura 4.3 - Representación del modelo de Kwok</i>	42
<i>Figura 4.4 - Efecto de los parámetros de las ecuaciones de Kwok sobre el ciclo de histéresis</i>	42
<i>Figura 5.1 - Pseudocódigo del Algoritmo Genético Simple</i>	46
<i>Figura 5.2 – Operador de cruce basado en un punto</i>	47
<i>Figura 5.3 – Operador de mutación</i>	47
<i>Figura 5.4 – “Adaptación media” frente a “Mejor Adaptación” en un Algoritmo Genético Simple</i>	48
<i>Figura 5.5 – Individuo visto como un circuito</i>	52
<i>Figura 5.6 – Operador de cruce basado en dos puntos</i>	52
<i>Figura 5.7 – Operador de cruce uniforme</i>	53
<i>Figura 6.1 – Tren modelado con Simpack</i>	55
<i>Figura 6.2 – Interface del módulo Pre-processor</i>	56
<i>Figura 6.3 – Interface del módulo Post-processor</i>	58
<i>Figura 6.4 – Discretización</i>	59
<i>Figura 6.5 - Ventana para el ajuste del tiempo de discretización</i>	59
<i>Figura 7.1 - Ciclo de histéresis</i>	60
<i>Figura 7.2 - Respuesta de las ecuaciones de Bouc-Wen. Fuerza frente a tiempo.</i>	61
<i>Figura 7.3 - Ciclo de histéresis modelo Kwok (rojo) y ciclo de histéresis modelo Bouc-Wen con <math>v=1</math> (azul)</i>	62
<i>Figura 7.4 - Ciclo de histéresis modelo Kwok (rojo) y ciclo de histéresis modelo Bouc-Wen con <math>v=1.5</math> (azul)</i>	63
<i>Figura 7.5 – Ciclo de histéresis modelo Kwok (rojo) y ciclo de histéresis modelo Bouc-Wen con <math>v=2</math> (azul)</i>	63
<i>Figura 7.6 – Ciclo de histéresis modelo Kwok (rojo) y ciclo de histéresis modelo Bouc-Wen con <math>v=2.5</math> (azul)</i>	64

<i>Figura 7.7 – Ciclo de histéresis modelo Kwok (rojo) y ciclo de histéresis modelo Bouc-Wen con <math>v=3</math> (azul)</i>	64
<i>Figura 7.8 – Evolución del parámetro <math>c</math> de las ecuaciones de Kwok al modificar la variable <math>v</math> de las ecuaciones de Bouc-Wen</i>	65
<i>Figura 7.9 – Evolución del parámetro <math>k</math> de las ecuaciones de Kwok al modificar la variable <math>v</math> de las ecuaciones de Bouc-Wen</i>	65
<i>Figura 7.10 – Evolución del parámetro <math>\alpha</math> de las ecuaciones de Kwok al modificar la variable <math>v</math> de las ecuaciones de Bouc-Wen</i>	66
<i>Figura 7.11 – Evolución del parámetro <math>\beta</math> de las ecuaciones de Kwok al modificar la variable <math>v</math> de las ecuaciones de Bouc-Wen</i>	66
<i>Figura 7.12 – Evolución del parámetro <math>\delta</math> de las ecuaciones de Kwok al modificar la variable <math>v</math> de las ecuaciones de Bouc-Wen</i>	67
<i>Figura 7.13 – Evolución del parámetro <math>f_0</math> de las ecuaciones de Kwok al modificar la variable <math>v</math> de las ecuaciones de Bouc-Wen</i>	67
<i>Figura 7.14 – Respuesta del amortiguador con el modelo de Kwok ajustado al modelo de Bouc-Wen con <math>v=2</math></i>	69
<i>Figura 7.15 – Respuesta del amortiguador con el modelo de Kwok ajustado al modelo de Bouc-Wen con <math>v=2.5</math></i>	69
<i>Figura 7.16 – Respuesta del amortiguador con el modelo de Kwok ajustado al modelo de Bouc-Wen con <math>v=3</math></i>	70

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el sistema de transporte por ferrocarril de alta velocidad ha adquirido un peso importante en España, dada la fuerte inversión que el gobierno ha realizado con la conexión de la ciudad de Madrid con el resto de capitales de provincia. España posee la red de alta velocidad más extensa de Europa y la segunda en todo el mundo, solo por detrás de China.

De las diferentes partes de las que está formado un vehículo ferroviario, la suspensión es un componente con un papel primordial desde el punto de vista del confort y la seguridad. En un vehículo ferroviario, a diferencia de un automóvil, existen dos sistemas de suspensión con funciones diferentes: una suspensión primaria encargada de asegurar el contacto de las ruedas con los raíles (seguridad), y una suspensión secundaria encargada de proporcionar confort a los pasajeros.

Es por ello que el desarrollo de los sistemas de suspensión ha sido fundamental para alcanzar velocidades tan elevadas, que en caso del AVE en España se llega a superar los 300 km/h.

Se debe introducir para este proyecto el concepto de “suspensión inteligente” haciendo referencia a la posibilidad de adaptación de la misma a distintas circunstancias, por lo que, desde el punto de vista del funcionamiento, se puede clasificar una suspensión en tres grupos, atendiendo a esta diferenciación: suspensión pasiva, suspensión semi-activa y suspensión activa.

En lo concerniente a este proyecto, una suspensión semi-activa se caracteriza por tener amortiguadores cuyo coeficiente de amortiguamiento es modificado por un control externo. Generalmente, estas suspensiones controlan las frecuencias bajas con elementos activos y las frecuencias altas con elementos pasivos. Ambos elementos trabajan de forma paralela, limitando las aceleraciones, y por consiguiente, aumentando el confort.

Dicho tipo de suspensión necesita para su funcionamiento de la información recogida por los distintos sensores repartidos por el vehículo y que le proporciona las condiciones necesarias para el cálculo de la mejor respuesta del amortiguador en cada momento.

## 1.2 OBJETIVOS

El principal objetivo que se pretende conseguir con el presente proyecto es de analizar el comportamiento dinámico vertical de un vehículo ferroviario equipado con suspensión semi-activa basada en amortiguadores magnetorreológicos.

Para ello, se modela un tren de pasajeros con la ayuda del software Simpack, sobre el cuál se realizan las modificaciones oportunas para convertir a la suspensión en una suspensión semi-activa, se realizan simulaciones sobre raíles con diferentes características (irregularidades que producirán vibraciones en el vagón y, por consiguiente, en los pasajeros) para posteriormente comparar los resultados obtenidos.

Para el modelado del comportamiento del amortiguador magnetorreológico, se hace uso de la herramienta Simulink del software Matlab. Dicha herramienta debe trabajar conjuntamente con Simpack para poder implementar un modelo de ecuaciones por el que los amortiguadores rijan su respuesta en cada momento.

## 1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El Proyecto Fin de Carrera consta de ocho capítulos, siendo el primero de ellos la presente introducción.

En el capítulo 2 se hace una breve descripción de las funciones que cumplen las suspensiones, así como de los elementos que las forman. También se describen los tipos de suspensiones (pasivas, semi-activas y pasivas), analizando más en profundidad las suspensiones semi-activas, ya que es el tipo de suspensión utilizada en el presente proyecto.

En el capítulo 3 se describe el funcionamiento de los amortiguadores magnetorreológicos.

En el capítulo 4 se muestran los modelos existentes más utilizados de amortiguadores MR que describen su comportamiento, prestando mayor atención al modelo propuesto por Kwok que el modelo utilizado para analizar el comportamiento dinámico del vehículo ferroviario.

En el capítulo 5 se explica en qué se fundamentan los algoritmos genéticos y para qué se utilizan.



En el capítulo 6 se describen los programas y las herramientas que se han usado para poder realizar la modelación y las simulaciones del vehículo ferroviario.

En el capítulo 7 se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones del vehículo ferroviario.

En el capítulo 8 se exponen las conclusiones obtenidas tras el análisis de las gráficas y datos aportados en el capítulo 7, y se abre una línea de futuros desarrollos.

## 2. LA SUSPENSIÓN

---

### 2.1 INTRODUCCIÓN

La suspensión de cualquier vehículo es una parte fundamental para llevar a cabo una circulación de forma segura y confortable. Sus objetivos principales son mantener en todo momento el contacto de la rueda con el raíl y absorber las irregularidades que puedan presentarse en la misma para garantizar el confort de los pasajeros.

Todo sistema de suspensión está compuesto por dos elementos principales:

- Un elemento elástico (normalmente un muelle)
- Un elemento amortiguador

Cada uno de los elementos mencionados anteriormente tiene su función específica. Mientras que el elemento elástico se encarga de almacenar la energía de las vibraciones producidas por las irregularidades de los raíles en el vehículo ferroviario, el elemento amortiguador disipa dicha energía en forma de calor.

En el caso particular de un vehículo ferroviario, se pueden diferenciar dos sistemas de suspensión:

- Suspensión primaria
- Suspensión secundaria

La suspensión primaria une el bastidor del bogie con los ejes de las ruedas, siendo su función principal la de asegurar el contacto rueda-raíl. Y la secundaria une el bogie con la caja, siendo su objetivo mantener los niveles de confort apropiados para los pasajeros.

En la Figura 2.1 se muestra un esquema con el que se puede tener una mejor idea sobre la disposición de los elementos de la suspensión primaria y la secundaria.

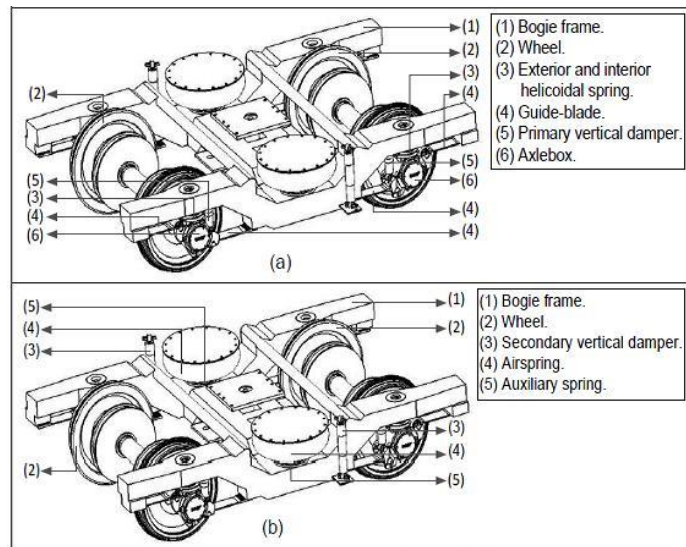


Figura 2.1 - (a) Suspensión primaria (b) Suspensión secundaria [11]

En cualquier sistema de suspensión se debe diferenciar entre masa suspendida y masa no suspendida, por lo que se definen ambos términos a continuación:

- Masa suspendida: término que se aplica a las masas de las partes del vehículo cuyo peso gravita sobre los muelles de las suspensiones. Está constituida por chasis, motor, carrocería, carga del vehículo, etc.
- Masa no suspendida: se denominan así las masas de los órganos que se apoyan directamente sin la interposición de los elementos elásticos de las suspensiones. Está constituida por ejes, ruedas, frenos, muelle, amortiguador, etc.

La relación entre las masas suspendidas y no suspendidas de un vehículo desempeña un papel fundamental en la estabilidad y en el confort. Para conseguir una buena estabilidad sobre un terreno irregular, es preciso que las ruedas sigan al máximo la forma de éste y que la carga que actúa sobre las mismas sea lo más constante posible. Para que se den estas condiciones, la relación entre las masas debería ser infinita; así, la estructura suspendida podría trasladarse tranquilamente sin notar el efecto de las pequeñas irregularidades, y las masas no suspendidas podrían experimentar aceleraciones verticales de cualquier magnitud sin que las acciones dinámicas consiguientes alterasen la fuerza de adherencia que actúa sobre los neumáticos.

En la práctica, esta condición no puede llevarse a cabo, pero se procura que las masas no suspendidas sean mínimas, de manera que se consiga una regularidad de carga suficiente en los neumáticos, en el caso de vehículos por carretera, con una adecuada flexibilidad de los muelles y un amortiguamiento correcto.

## 2.2 COMPONENTES DE UNA SUSPENSIÓN

### 2.2.1 ELEMENTOS ELÁSTICOS

#### 2.2.1.1 Ballestas

Las ballestas fueron el primer sistema de suspensión existente que empezó a ser usado en carruajes tirados por caballos para absorber las irregularidades de las calzadas empedradas. Se trata de un sistema muy sencillo y robusto, aunque sus prestaciones están muy limitadas [1].

La ballesta es un conjunto elástico realizado con láminas de acero templado apiladas una encima de la otra (Figura 2.2). Esta configuración permite a estas láminas doblarse bajo la acción de una fuerza, retornando a su posición inicial tras el cese de la misma.

Las láminas de acero que componen la ballesta reciben el nombre de hojas, y su longitud siempre es diferente respecto a las contiguas, de mayor a menor. Las hojas se mantienen unidas mediante un orificio central común a todas ellas, atravesado por un tornillo llamado tornillo capuchino. El conjunto de la ballesta se une al bastidor del vehículo mediante la hoja más larga, usualmente ubicada en la posición más alta. Esta hoja recibe el nombre de hoja maestra, y sus extremos (denominados ojos) están curvados tomando una forma cilíndrica para permitir su encaje en el bastidor.

Para mantener la alineación de las hojas, además del tornillo capuchino central se dispone de varias bridas en U que impiden el desalineado durante el proceso de absorción de golpes del sistema de suspensión. Estas bridas se llaman abarcones.

La rigidez del sistema depende de parámetros como el número de hojas, la aleación de los materiales utilizados en las mismas, su curvatura y su longitud.



*Figura 2.2 - Ballesta de suspensión [13]*

### 2.2.1.2 Muelles helicoidales

El muelle helicoidal es el sistema elástico más utilizado en los sistemas de suspensión. Se trata de un hilo de acero de sección redonda, cuadrada u ovalada, enrollado en forma de hélice cilíndrica a la izquierda o a la derecha, y a su vez con paso uniforme o variable, cuya rigidez depende de parámetros como: diámetro del hilo, número de espiras, materiales de construcción y paso entre espiras [2].

Los muelles helicoidales de sección redonda son los que presentan mejores atributos debido a que las tensiones que se generan en el muelle son menores a los otros tipos de sección (Figura 2.3). Por otro lado los muelles helicoidales de sección cuadrada y ovalada tienen que soportar tensiones mayores respecto a los muelles de sección redonda, por lo que la duración de estos muelles es ligeramente inferior debido a una distribución de las tensiones más desfavorable.

La diferencia entre un paso variable o uniforme es que en un resorte con paso uniforme, la relación entre la fuerza ejercida y la deformación es lineal (en teoría), mientras que con un paso variable esta relación no es proporcional. Con esta variante se logra obtener una mayor fuerza para un determinado desplazamiento comparado con otro resorte dimensionalmente igual pero de paso constante. En aplicaciones especiales en que se necesita eliminar el efecto de resonancia, esta es una solución de la misma.

Para conseguir un buen apoyo y un funcionamiento correcto, los extremos del resorte han de presentar superficies de apoyo planas y perpendiculares a su eje; por este motivo, las dos espiras de los extremos (espiras de apoyo) están más próximas entre sí (disminución del paso) y rectificadas cuando sea necesario.

A su vez, las espiras de los extremos se pueden presentar enrolladas con un diámetro más pequeño, para facilitar su montaje en cilindros con ensanche lateral.



Figura 2.3 - Muelles helicoidales (secciones: redonda, cuadrada y ovalada) [18]

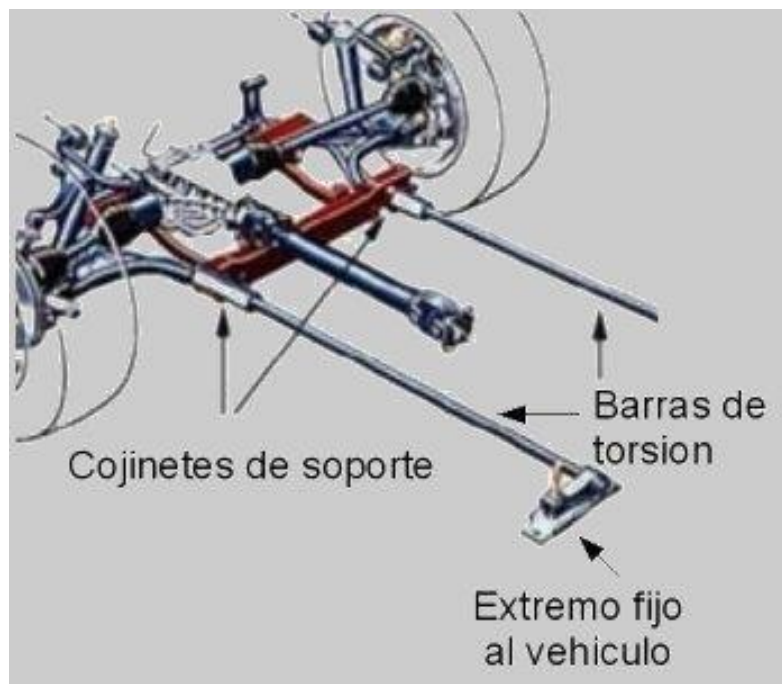
Es necesario comentar que los muelles no trabajan con esfuerzos laterales, únicamente soportan los longitudinales e incluso pueden trabajar a torsión, retorciéndose proporcionalmente a la carga y recuperando su forma original al cesar esta. En cambio, los muelles si deben poder desplazarse lateralmente para poder absorber las reacciones provenientes de la rueda, por lo que se les acoplan unas bielas que proporcionen empuje transversal.

### *2.2.1.3 Barras de torsión*

Una barra de suspensión no es más que una barra de acero (Figura 2.4), de tal manera que se aprovechan sus propiedades a torsión para el elemento elástico de la suspensión. Al aplicar un esfuerzo torsor a la barra girará un ángulo proporcional a dicho esfuerzo, volviendo a su posición original al dejar de aplicar la fuerza [3].

Este tipo de elemento es más común verlo en vehículos automóviles como coches y camionetas debido a su bajo coste de producción, instalación y mantenimiento.

La rigidez a torsión dependerá del diámetro de la misma y de las propiedades de los materiales utilizados en su fabricación.



*Figura 2.4 - Barra de torsión [15]*

#### 2.2.1.4 Muelles neumáticos

El muelle neumático es un tipo de elemento elástico que consiste simplemente en una bolsa de caucho rellena de aire a presión (Figura 2.5) o de un cilindro telescópico igualmente relleno de aire a presión.

Los muelles neumáticos suelen utilizarse en vehículos pesados de carretera, pero cada vez más empiezan a ser usados en la suspensión secundaria de los trenes por las ventajas que presentan:

- Permiten mantener una altura constante de la caja mediante la inyección o extracción de aire de los resortes.
- Son poco ruidosos.
- La curva de fuerza-deformación es progresiva.
- Reducen la amplitud de cabeceo y balanceo.

Pero no todo son ventajas, también existen ciertos inconvenientes como:

- No admiten esfuerzos transversales, por lo que suelen estar integrados en una estructura que sólo permita movimientos longitudinales.
- Es necesario equipar al vehículo con una bombona de aire comprimido o con una bomba de aire para inflar y desinflar el resorte neumático.
- Todos los elementos auxiliares que necesita este tipo de elemento elástico la hace finalmente más pesada que otros sistemas.
- Un deterioro de los resortes o un fallo en la inyección de aire deja al vehículo sin suspensión, por lo que suele montarse en paralelo otro elemento amortiguador más convencional como pueda ser un resorte helicoidal.



Figura 2.5 - Muelle neumático [14]

## 2.2.2 ELEMENTOS AMORTIGUADORES

Como ya se ha mencionado anteriormente en el apartado 2.1, los elementos amortiguadores son los encargados de disipar la energía absorbida por el vehículo ante las posibles irregularidades de los raíles por la que circula. A continuación, se muestran los diferentes sistemas que existen para conseguir dicho objetivo.

### 2.2.2.1 Amortiguador hidráulico

El funcionamiento de un amortiguador hidráulico, como el de todos los amortiguadores, se basa en la transformación de la energía cinética en calor. Para lograrlo se hace uso de aceite hidráulico en el interior del amortiguador, el cuál dispone de dos cámaras comunicadas por unos orificios a través de los cuáles debe pasar el aceite (Figura 2.6).

La resistencia de los amortiguadores hidráulicos resulta del movimiento del pistón, dependiendo de la viscosidad del aceite hidráulico y de la resistencia que opongan los orificios que comunican ambas cámaras a que el aceite circule de una a otra.

Generalmente, la elección del amortiguador hidráulico incorporado a cada vehículo por los constructores es generalmente una “solución de la compromiso” entre la comodidad de los ocupantes y la seguridad de la conducción, basada en la experiencia de numerosas pruebas hechas en centros de búsqueda y desarrollo, ya que la constante de amortiguamiento de este sistema en concreto no puede modificarse convenientemente en función de las condiciones de circulación del vehículo de cada momento.

Una suspensión “dura” aumenta la seguridad del vehículo, sobre todo a altas velocidades de circulación, empeorando el nivel de confort de los pasajeros. Por el contrario, una suspensión “blanda” favorece el confort de los pasajeros, pero la seguridad se ve comprometida al aumentar la posibilidad de que las ruedas se despeguen de la vía con un bache, por eso se ha hablado anteriormente de llegar a una “solución de compromiso” para no comprometer la seguridad ni el confort.

Las ventajas que presentan estos amortiguadores son la sencillez, la ausencia de mantenimiento y su capacidad para ejercer mayor amortiguación cuanto mayor es la presión.





Figura 2.6 - Amortiguador hidráulico [17]

#### 2.2.2.2 Amortiguadores hidráulicos con válvulas

El amortiguador hidráulico con válvulas se diferencia constructivamente del anterior en un aspecto, y es que en lugar de haber unos simples orificios que comunican las dos cámaras existentes, hay unas válvulas que son las encargadas de permitir el paso del aceite hidráulico (Figura 2.7).

Estas válvulas tienen la ventaja que pueden abrirse o cerrarse para regular el paso del aceite entre cámaras, lo que quiere decir que se puede modificar la dureza del amortiguador, y según las condiciones a las que circule el vehículo se podrá adaptar este parámetro de forma más óptima a las exigencias requeridas.

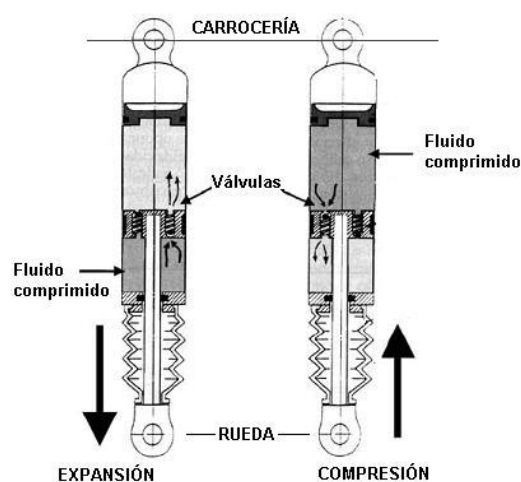


Figura 2.7 - Amortiguador hidráulico con válvula [16]

#### 2.2.2.4 Amortiguador de fricción seca

Si se fija la atención en un automóvil de la década de 1920 es posible apreciar que mientras la suspensión tiene muelles, los amortiguadores como los que se conocen en la actualidad no están presentes. Eso es debido a que la mayoría de los coches de esa época utilizan amortiguación por fricción, que se compone a menudo de un conjunto de discos apilados de cuero y acero en cada rueda.

Durante el movimiento de suspensión, los discos mencionados anteriormente giran uno contra el otro, proporcionando una resistencia de fricción al movimiento de la suspensión. La fuerza de la amortiguación se puede ajustar por una arandela de resorte, la cual comprime más o menos las parejas de discos [7].

La amortiguación por fricción (o de Coulomb) proporciona una disminución constante en la extensión del resorte durante cada ciclo como cualquier otro sistema de suspensión, pero la principal diferencia que presenta este sistema del resto es que no importa si el movimiento inicial fue muy rápido o relativamente lento, ya que este tipo de amortiguación no varía la fuerza con la velocidad como los amortiguadores hidráulicos.

Como se puede observar en la Figura 2.8, la amortiguación hace que los movimientos oscilatorios de la masa se mitiguen linealmente con el tiempo.

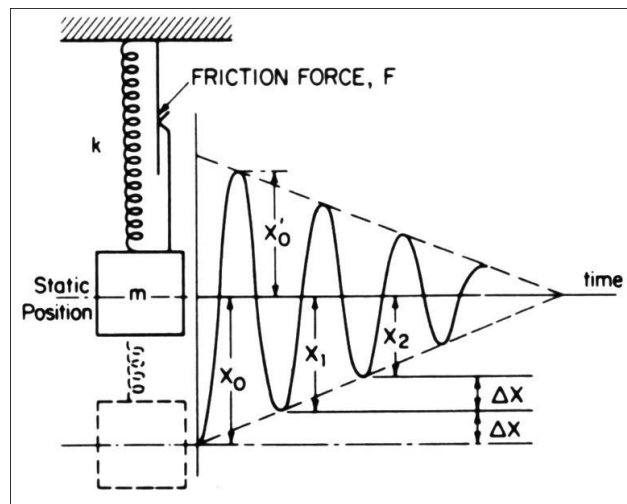


Figura 2.8 - Gráfica del amortiguamiento de Coulomb [7]

En la Figura 2.9 puede apreciarse cómo se dispone este sistema de suspensión en la rueda de un vehículo basado en el fenómeno de la fricción.



*Figura 2.9 - Suspensión de Coulomb [7]*

Uno de los mayores inconvenientes de estos sistemas es el mantenimiento constante que requieren y su pérdida de efectividad con el paso de los ciclos de vida, debido al desgaste tan severo que sufren, por lo que no pueden instalarse en vehículos que demanden grandes exigencias de trabajo. Es necesario añadir que este tipo de suspensiones están obsoletas y que no tienen ninguna utilidad en ninguno de los vehículos de hoy en día.

### 2.2.2.5 Amortiguador magnético

El amortiguador magnético se caracteriza por tener encerrados dos imanes dentro de una carcasa de material no imantable, encarados por sus polos iguales para aprovechar su efecto de repulsión y conseguir de esta manera el amortiguamiento (Figura 2.10).

Dispone de dos émbolos para la sustentación y agarre de los imanes y que sirven también como punto de apoyo a los muelles, que los abrazan y que cumplen la función de reguladores del campo magnético creado por los dos imanes, provocando el movimiento ascendente y descendente de los émbolos en función de la fuerza de empuje en cada uno de los extremos de los mismos. Este conjunto queda dispuesto para realizar la función de amortiguación y suspensión de objetos pesados, siendo útil su aplicación en la industria del ferrocarril así como en la industria de maquinaria pesada [6].

Una de las ventajas que presenta este sistema es que no existe ningún fluido (únicamente el lubricante para las partes móviles del cilindro), por lo que no son necesarios los aislamientos tan estrictos que los sistemas mencionados anteriormente requieren. El principal inconveniente de este sistema es que es muy caro.

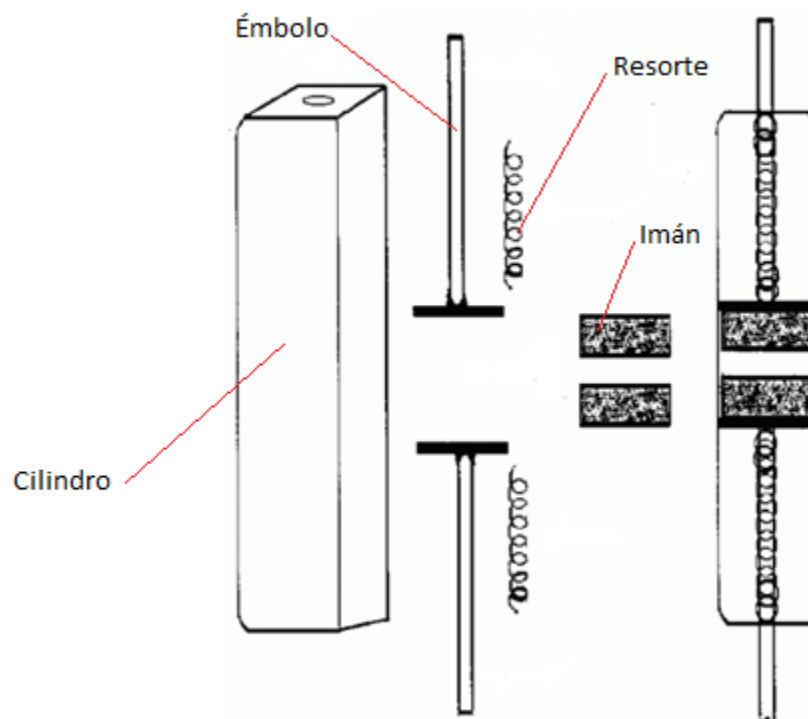


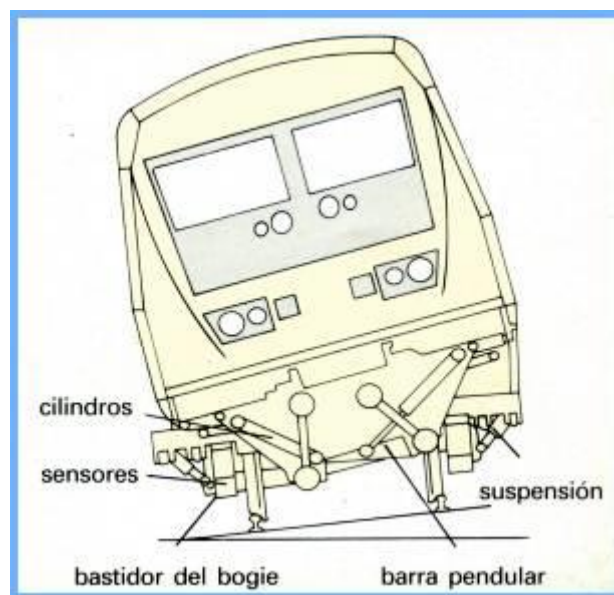
Figura 2.10 - Amortiguador magnético [6]

## 2.3 TIPOS DE SUSPENSIONES MONTADAS EN VEHICULOS FERROVIARIOS

### 2.3.1 TREN PENDULAR X2000

El X2000 es un tren pendular desarrollado por la compañía sueca SJ (Statens Järnvägar) en 1995 debido a la necesidad de mejorar el transporte ferroviario y ante la imposibilidad de construir mejores vías por su elevado coste, dado que Suiza dispone de una de las topografías más montañosas de entre los países de la Unión Europea.

En la Figura 2.11 puede observarse el mecanismo pendular de este tren.



*Figura 2.11 – Sistema pendular X2000 [26]*

El mecanismo de pendulación se controla mediante un acelerómetro en el extremo del tren, que en ese momento se encuentre delante y se mide en un bogie de cada coche. La inclinación depende de la velocidad y del radio pero está limitada a un valor tal que un viajero que esté sentado a un lado del coche quede 300 mm más alto o más bajo que el del otro lado, más la diferencia de altura debida al peralte. Este sistema no funciona por debajo de los 45 km/h [26].

Un aspecto interesante es que, además de contar con mecanismo pendular, los ejes de cada bogie son "orientables". Cada eje tiene una libertad de movimiento que le permite adoptar una posición radial en las curvas, que son casi continuas en la accidentada Suecia [26].

### 2.3.2 TREN PENDULAR DE TALGO

A continuación se habla sobre la patente de la empresa Talgo, que usa un sistema de suspensión pendular para la suspensión secundaria en sus trenes, permitiéndoles incrementar la velocidad de paso por curva sin perder el nivel de confort en los pasajeros.

El sistema de péndulo de los trenes Talgo es el denominado de “péndulo natural” y consiste en elevar el “centro instantáneo de rotación” de la suspensión, por encima del “centro de gravedad” del sistema. Esto da lugar a la generación de un “sobrepalante en la caja” que proporciona una disminución de la aceleración lateral que siente el viajero para una misma velocidad de paso por curva. De esta forma se consigue un incremento del nivel de confort lateral.

El sistema es totalmente inercial y no necesita de elementos internos ni externos que obliguen a la caja a girar de forma pendular, por lo que es totalmente fiable y con coste nulo en mantenimiento [12].

Con la Figura 2.12 se entiende mejor el comportamiento de este sistema, al compararlo con un tiovivo.

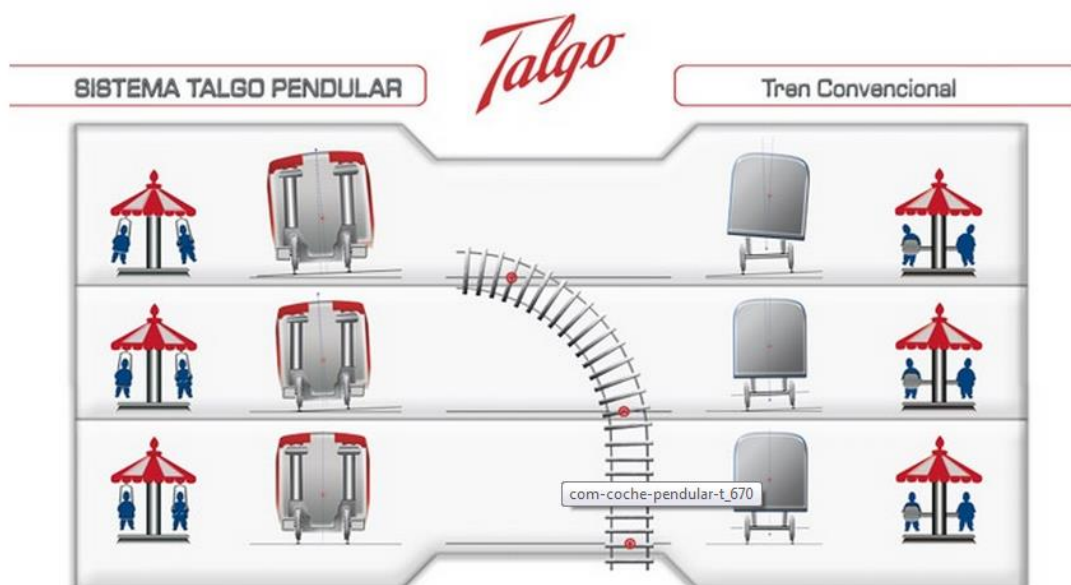


Figura 2.12 - Sistema pendular de Talgo [12]

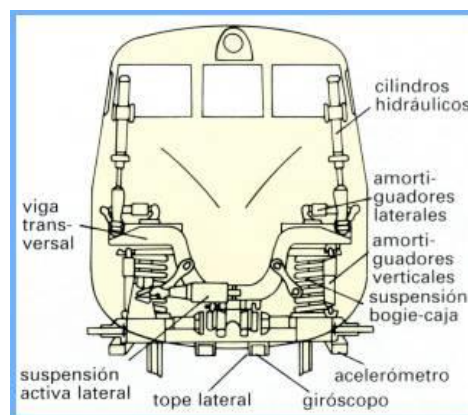
### 2.3.3 FIAT PENDOLINO

En los trenes pendulares, compensar la fuerza centrífuga al 100% con la inclinación era un error. Compensándola totalmente, un viajero que estuviera leyendo o hablando no se daría cuenta que ya no estaba en la línea vertical, ni de que estaba describiendo una curva. Un vistazo a través de la ventana, le haría darse cuenta que la perspectiva que veía era incompatible con lo que le indicaban sus sentidos, este tipo de desorientación podía marearle [27].

Cuando, en julio de 1976, el tren Fiat Pendolino (Figura 2.13) entró en servicio, los italianos se tomaron más en serio ese problema de desorientación. Oyeron las quejas de los viajeros y descubrieron que parte del problema eran los asientos situados en sentido contrario a la marcha, de manera que en los diseños posteriores los asientos fueron abatibles.

Una inclinación demasiado rápida desconcertaba también a los viajeros. La basculación de cinco grados por segundo que registraba el prototipo del Pendolino cuando alcanzaba la inclinación máxima era demasiado rápida. Una inclinación de tres grados por segundo era mucho más cómoda y justo la que necesitaba. La manera de conseguir una basculación más lenta en los compartimentos de viajeros es adoptar un grado de inclinación menor, y puesto que los viajeros están incómodos con una compensación del 100%, se pueden aceptar ángulos de inclinación más pequeños. Por ejemplo, en el sistema pendular pasivo del Talgo Pendular español, sólo se consigue una inclinación de cuatro grados [27].

El Pendolino fue diseñado para alcanzar una inclinación de nueve grados. Cuando se probó el Pendolino en Alemania se pretendía conseguir una compensación del 70%, para lo cual se necesitaba tan sólo un ángulo de inclinación de siete grados. Este ángulo permitía que la velocidad en la curva se incrementara en un 20 % por encima del límite establecido.

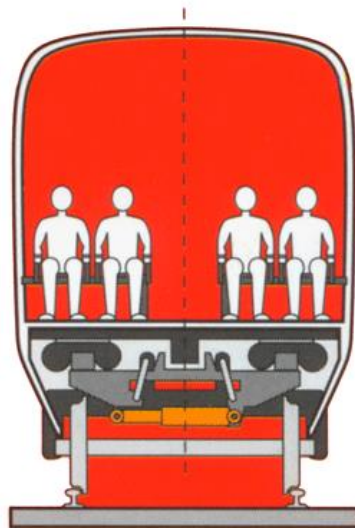


*Figura 2.13 – Sistema del Fiat Pendolino [27]*

### 2.3.4 CAF: TECNOLOGÍA SIBI

El Sistema SIBI de CAF es un Sistema de Basculación Activa que permite proporcionar a los vehículos ferroviarios un efecto peralte adicional al existente en la vía, reduciendo el efecto de la fuerza centrífuga experimentada por los pasajeros y permitiendo circular a velocidades superiores sin pérdida de confort durante las curvas del trayecto (Figura 2.14). Se consigue de esta forma reducir los tiempos de trayecto en un 30% [28].

Apenas existe competencia al respecto. Su diferenciación sería que el SIBI es un sistema activo que conoce la ubicación del tren en cada momento mediante una serie de sensores y el apoyo de un sistema GPS y se anticipa activando la basculación antes de la entrada en las curvas.



*Figura 2.14 – Sistema de la tecnología SIBI [28]*

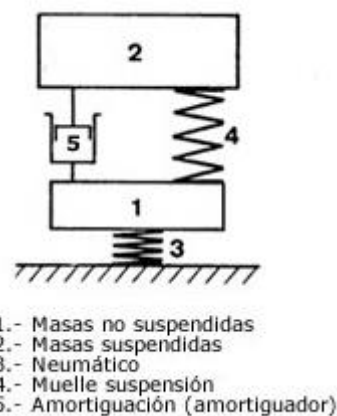


## 2.4 TIPOS DE SUSPENSIONES

En este apartado se describe cómo se distribuyen los elementos que componen un sistema de amortiguación y también se muestra cómo las diferentes combinaciones de los elementos descritos en los apartados anteriores modifican el comportamiento de la suspensión.

### 2.4.1 SUSPENSIONES PASIVAS

La suspensión pasiva es la configuración más sencilla y usada en la actualidad para mitigar las irregularidades sobre el perfil de la vía. A grandes rasgos, constructivamente se trata de un sistema con un resorte y un amortiguador en paralelo que unen la masa suspendida con la no suspendida del vehículo como puede apreciarse en la Figura 2.15 [8].



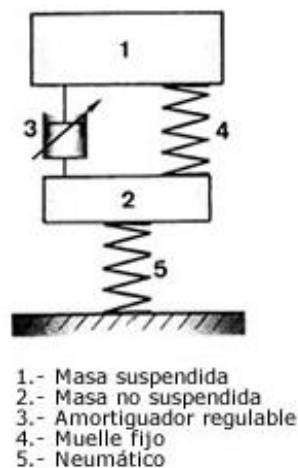
*Figura 2.15 - Esquema suspensión pasiva para una rueda [8]*

No obstante, este tipo de configuración no alcanza un nivel de funcionamiento 100% satisfactorio, siendo necesario para el diseñador llegar a “una solución de compromiso” entre confort y seguridad. Esto se debe a que, así como a nivel de confort para los pasajeros lo ideal es una suspensión blanda, no lo es tanto a nivel de seguridad ya que se produce un excesivo balanceo en las curvas y favorece el cabeceo durante la frenada, comprometiendo la seguridad de los pasajeros. La solución al problema de la seguridad sería usar una suspensión más rígida, que limitaría el balanceo en curva y el cabeceo, pero el confort de los pasajeros se vería disminuido, por eso se ha mencionado anteriormente que es necesario llegar a una solución intermedia entre ambas características.

### 2.4.2 SUSPENSIONES SEMI-ACTIVAS

La suspensión semi-activa es la que se va a emplear para el desarrollo del proyecto en el estudio de la suspensión secundaria de un tren (Figura 2.16).

La configuración de los elementos de una suspensión semi-activa consta de un resorte y un amortiguador trabajando en paralelo. La principal característica de este tipo de suspensiones es que el amortiguador es regulable, esto quiere decir que puede modificar su constante de amortiguamiento adaptándose a las exigencias solicitadas por la vía en cada momento si se implementa un sistema de control que lo regule [8]. También existe el caso en el que el elemento elástico cambie su comportamiento. Como en la mayoría de las suspensiones el elemento elástico es un resorte en el que es prácticamente imposible cambiar su comportamiento, generalmente es el amortiguador el que cambia su comportamiento, pero en las suspensiones en las que el elemento elástico es un muelle neumático, existe la posibilidad de cambiar su comportamiento.



*Figura 2.16 - Esquema suspensión semi-activa para una rueda [8]*

Los amortiguadores que proporcionan la capacidad de variar la constante de amortiguamiento serían: los amortiguadores magnetorreológicos y los amortiguadores hidráulicos con válvulas.

Es necesario implementar un ciclo de control que gestione la información proveniente de los sensores (velocidad, aceleración, fuerzas, etc.) para generar una respuesta acorde a las exigencias de la vía en cada instante a los amortiguadores.

Uno de los parámetros que define la calidad de estos sistemas es el tiempo de respuesta, que a su vez indica el ancho de banda. Si este ancho de banda abarca un

rango de hasta 5 Hz, el sistema de suspensión se denomina de baja frecuencia, mientras que si abarca frecuencias de hasta 12 Hz, se denomina alta frecuencia.

A pesar de que los sistemas para altas frecuencias ya existen, su elevado coste hace que su uso sea muy restringido. Por eso se usan las suspensiones semi-activas, que controlan las bajas frecuencias con elementos activos (actuadores) y las altas frecuencias con elementos pasivos (resortes y amortiguadores), dejando bloqueado el funcionamiento de los actuadores.

### 2.4.3 SUSPENSIONES ACTIVAS

En una suspensión activa (Figura 2.17), los únicos elementos existentes entre la masa suspendida y la no suspendida son unos actuadores, que necesitan de una fuente de energía externa para generar las fuerzas que compensen el balanceo y el cabeceo del vehículo. No hay ni resortes ni amortiguadores [8].

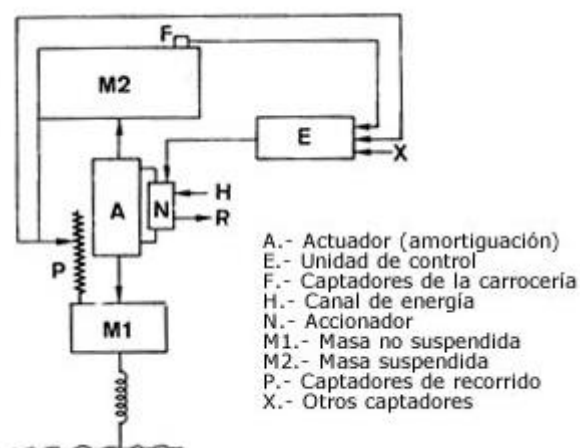


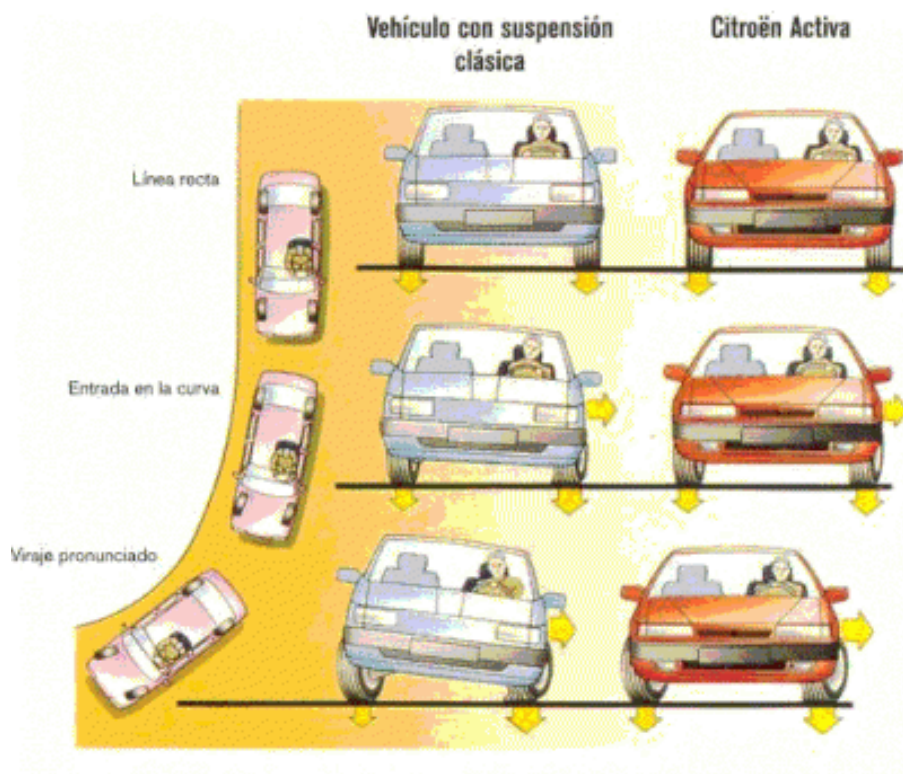
Figura 2.17 - Esquema de una suspensión activa para una rueda [8]

Para determinar las fuerzas que deben ejercer en cada momento los actuadores es necesario implementar un sistema de control con unos sensores que proporcionen la información necesaria para ser procesada por la unidad de control y generar la respuesta (las fuerzas que deben ejercer los actuadores) adecuada a cada situación.

Las suspensiones activas ofrecen una solución tecnológica muy avanzada para el desarrollo de vehículos seguros y capaces de combinar grandes niveles de confort, control y maniobrabilidad. El mayor inconveniente de estas suspensiones es la necesidad de incorporar una fuente de energía para alimentar a los actuadores, existiendo la posibilidad de que sea totalmente independiente o dependiente del sistema de propulsión del vehículo, de tal forma que puede verse comprometida la

capacidad de tracción del vehículo ante un requerimiento elevado de energía por parte de los actuadores.

En la Figura 2.18 se comparara un sistema de suspensión activa con uno pasivo en dos automóviles, pudiéndose observar cómo se mantiene la horizontalidad de la carrocería en el vehículo que equipa el sistema de suspensión activa.



*Figura 2.18 - Comparación entre suspensión pasiva y activa [8]*

## 3. AMORTIGUADORES MAGNETORREOLOGICOS

### 3.1 FLUIDOS MAGNETORREOLOGICOS

#### 3.1.1 REOLOGÍA

Para comprender los fluidos magnetorreológicos, primero se debe tener conocimiento sobre lo que es la reología, que es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación (Figura 3.1) en los materiales que son capaces de fluir. Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales.

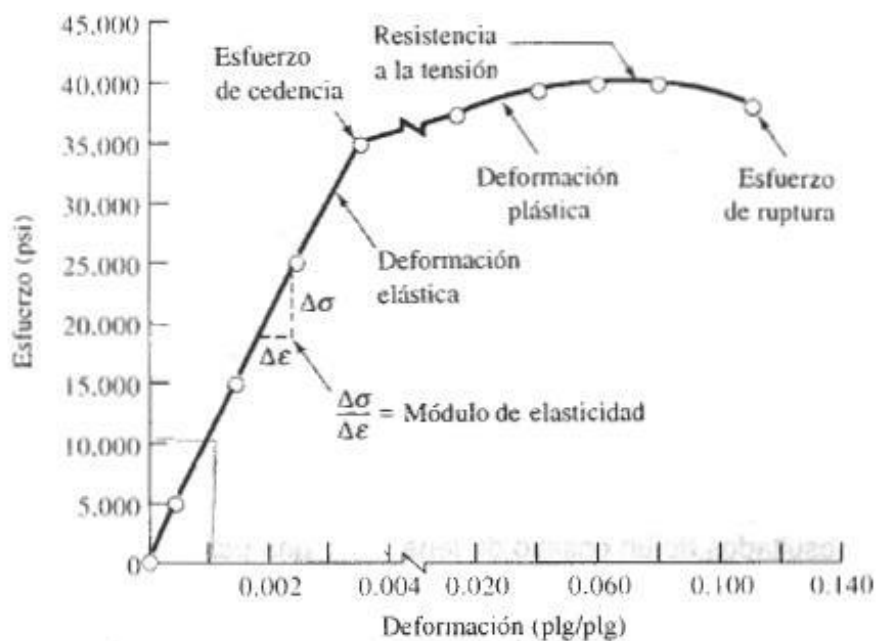


Figura 3.1 - Curva de esfuerzos-deformaciones general [21]

Un sólido ideal se deforma elásticamente si la energía requerida para la deformación se recupera totalmente cuando se retira el esfuerzo aplicado. Mientras que, los fluidos ideales se deforman irreversiblemente, fluyen, y la energía requerida para la deformación se disipa en el interior del fluido en forma de calor y no se puede recuperar al retirar el esfuerzo. Pero sólo unos pocos líquidos se comportan como líquidos ideales, la inmensa mayoría de los líquidos muestran un comportamiento reológico que se clasifica en una región intermedia entre los líquidos y los sólidos, son a la vez elásticos y viscosos, por lo que se les denomina viscoelásticos. Por otra parte, los sólidos reales pueden deformarse irreversiblemente bajo la influencia de fuerzas de suficiente magnitud, en definitiva, pueden fluir [22].

En esta clasificación de los comportamientos reológicos de los materiales con relación a su respuesta a los esfuerzos aplicados se ha de introducir un nuevo parámetro que es la escala de tiempo en la cual se aplica la deformación. Para ello, se define una nueva magnitud que tenga en cuenta el tiempo de observación; se trata del número de Deborah:

$$De=\lambda/t$$

donde  $\lambda$  es el tiempo de relajación y  $t$  es el tiempo de observación.

En este sentido se puede decir que los sólidos tienen un tiempo de relajación infinito, mientras que en el caso de los líquidos este valor se aproxima a cero, por ejemplo, el tiempo de relajación del agua es de 10-12 s. Por otra parte, si se consideran procesos de deformación característicos asociados a los típicos tiempos de observación, se puede decir que un número de Deborah grande define un comportamiento tipo sólido y un número de Deborah pequeño define un comportamiento tipo líquido.

### 3.1.2 INTRODUCCIÓN A LOS FLUIDOS MAGNETORREOLÓGICOS (FMR)

Los fluidos magnetorreológicos (FMR) son soluciones acuosas de microesféricas paramagnéticas (material paramagnético: material que tiene un momento magnético permanente y que en presencia de un campo magnético externo, sus moléculas se alinean en la dirección de dicho campo) que contienen gránulos de magnetita dispersos, a esta solución se añade un surfactante (sustancia que reduce la tensión superficial de un líquido) para estabilizar las suspensiones. Las partículas no tienen remanencia ni histéresis magnética y según el tamaño de las partículas que están disueltas en el fluido pueden ser llamados ferro-fluidos si sus partículas son de 3 a 15nm y fluidos magnetorreológicos si están entre 0.05 y 8 micras [23].

La formación de estos agregados cambia drásticamente las propiedades mecánicas y ópticas de las suspensiones. Los fluidos magnetorreológicos son materiales que responden a la aplicación de un campo magnético con un cambio en su comportamiento reológico; bajo la acción de un campo magnético constante las partículas adquieren momento dipolar que genera una fuerza atractiva entre las partículas, la cual produce la agregación de las partículas en forma de collares de cuentas alineados con el campo magnético, razón por la cual se da el drástico cambio en su comportamiento reológico. Este cambio se manifiesta mediante el desarrollo de un esfuerzo que crece con el campo aplicado. De ahí su habilidad para proveer una simple, silenciosa y rápida respuesta en la interfase entre controles electrónicos y sistemas mecánicos. La respuesta de los fluidos magnetorreológicos es resultado de la polarización inducida en las partículas suspendidas mediante la aplicación de un campo magnético externo, la interacción entre los dipolos inducidos resultantes obliga a las partículas a formar estructuras en forma de columna y paralelas al campo aplicado, estas estructuras tipo cadena restringen el movimiento del fluido dando lugar a un incremento a las características viscosas de la suspensión. La energía mecánica necesaria para producir estas estructuras tipo cadena se incrementa conforme crece el campo aplicado, dando como resultado un esfuerzo dependiente del campo [23].

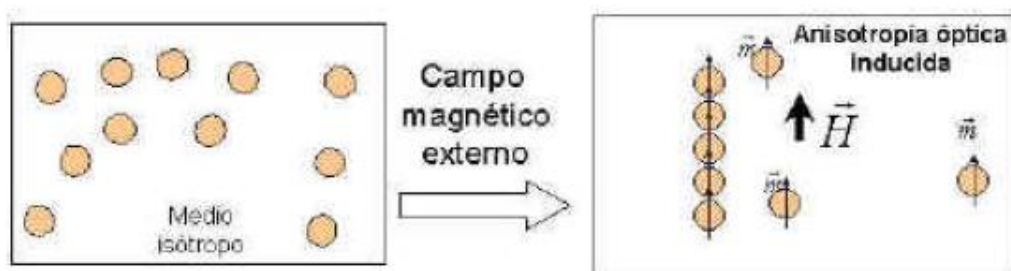


Figura 3.2 - Anisotropía óptica inducida por un campo magnético [23]

### ***3.1.2.1 Propiedades reológicas***

Las propiedades reológicas de este tipo de fluidos están determinadas por lo siguiente [23]:

- Concentración y densidad de las partículas.
- Distribución de forma y tamaño de las partículas
- Las propiedades del fluido portador.
- Aditivos adicionales.
- La intensidad de campo magnético aplicado.
- La temperatura
- Otros factores.

### ***3.1.2.2 Propiedades magnéticas***

Los materiales superparamagnéticos (materiales con algunas características del ferromagnetismo y otras del paramagnetismo) son los ideales para la construcción de este tipo de fluidos magnetorreológicos, su comportamiento en presencia de un campo magnético es muy conveniente para el funcionamiento esperado de este tipo de amortiguadores [23].

Una vez aplicado un campo magnético a un fluido magnetorreológico, la primera reacción es la alineación de las partículas suspendidas en la dirección del campo magnético aplicado, formando una estructura fibrosa que cambia las características del fluido. Cuando quitamos el campo magnético, y debido a que los materiales superparamagnéticos no tienen remanencia ni histéresis magnética, es decir, al quitar el campo magnético las partículas suspendidas en el fluido no quedan magnetizadas, el fluido magnetorreológico se comporta como un fluido newtoniano normal.

## **3.2.3 COMPORTAMIENTO FRENTE A UN CAMPO MAGNÉTICO**

Cuando no existe campo magnético exterior los fluidos magnetorreológicos pueden considerarse fluidos newtonianos. En esta condición se comportan como un



fluido normal, es decir, ante una velocidad de deformación de deslizamiento oponen un esfuerzo viscoso y este esfuerzo es proporcional a la velocidad de deformación a través de la viscosidad del fluido.

Cuando se aplica un campo magnético exterior, las partículas en suspensión forman cadenas en la dirección del campo. Si el campo se aplica perpendicularmente a la dirección del flujo del fluido entonces las cadenas se forman perpendicularmente al flujo (Figura 3.3) y como consecuencia del propio flujo estas cadenas se rompen y deben ser otra vez formadas, de manera que la continua rotura y formación de cadenas da como resultado la aparición de un esfuerzo que se opone al movimiento [23].

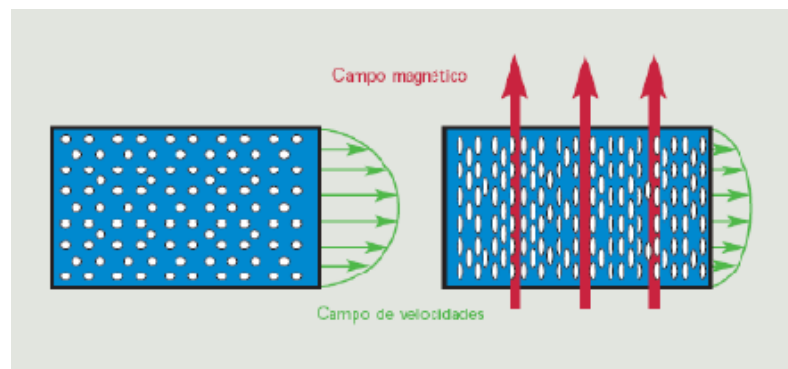


Figura 3.3 - Comportamiento de un FMR en presencia de un campo magnético [23]

Ante esfuerzos inferiores al de fluencia, el fluido reológico responde como un sólido viscoelástico. La ventaja que presentan estos fluidos es que para conseguir una velocidad de deformación determinada es necesario un esfuerzo viscoso superior al que correspondería en el caso de un fluido ordinario, y este esfuerzo es controlable en función de la intensidad del campo magnético exterior. Este aumento del esfuerzo viscoso no se debe a un aumento de la viscosidad, sino que se produce porque el esfuerzo de fluencia aumenta con el valor del campo exterior. En la Figura 3.4 se muestra las curvas características de los fluidos reológicos [23].

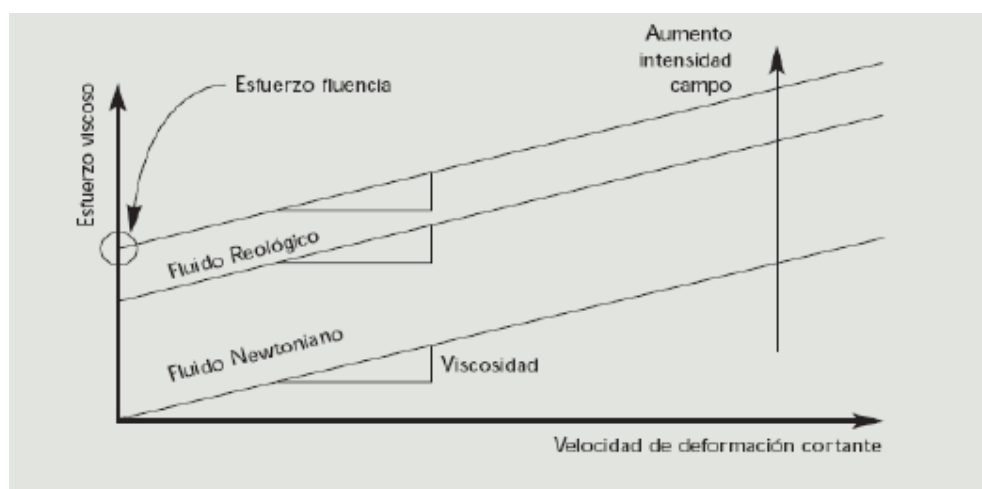


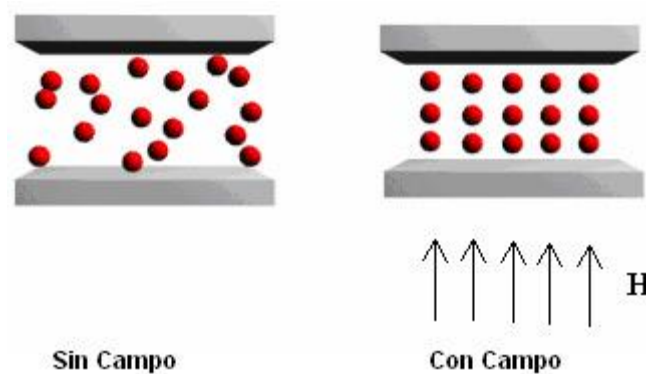
Figura 3.4 - Curva característica de los FMR [23]

El aumento de esfuerzo viscoso de estos fluidos es la razón por la que estos fluidos son atractivos para aplicaciones relacionadas con el amortiguamiento y control activo de vibraciones.

### 3.2 AMORTIGUADOR MAGNETORREOLÓGICO

Para entender el funcionamiento de este tipo de amortiguador, se debe tener en mente todo lo explicado anteriormente acerca de los fluidos magnetorreológicos.

Se recuerda que estos fluidos responden a la aplicación de un campo magnético con un cambio en su comportamiento reológico y que están formados por partículas magnetizables finamente divididas y suspendidas en un líquido portador, tal como aceite mineral, keroseno, etc. o en un sólido portador con elasticidad suficiente para permitir la orientación de los dipolos ante el campo magnético externo. La respuesta producida en los materiales magnetorreológicos, es el resultado de la polarización inducida en las partículas suspendidas mediante la aplicación de un campo externo (Figura 3.5). La interacción entre los dipolos inducidos resultantes, obliga a las partículas a formar estructuras en forma de columna, paralelas al campo aplicado [4].



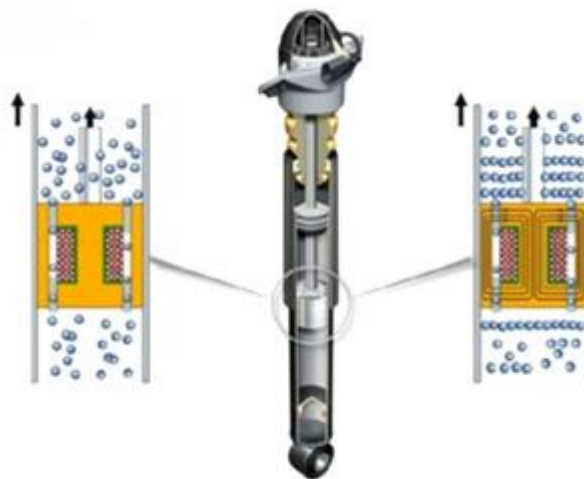
*Figura 3.5 - Fluido magnetorreológico [4]*

Sin la presencia de un campo magnético, las partículas de hierro están dispersas al azar en el seno del fluido. A medida que aumenta el campo magnético, el fluido se vuelve fibroso por la reorganización de las partículas, y su estructura llega a ser casi plástica.

Las reacciones del fluido al pasar por los orificios del amortiguador cambian con la diferencia de viscosidad. Cuando no está magnetizado, hay una gran diferencia de velocidad entre las partículas que están próximas a las paredes del orificio, y las que fluyen rodeadas de otras partículas de fluido. Gracias a esa diferencia de velocidad, el caudal puede ser grande y, por tanto, el amortiguador es suave. Cuando el fluido está

magnetizado, la velocidad de todas las partículas es muy semejante por lo que el flujo es más lento y, por tanto, la dureza del amortiguador aumenta [5].

De esta manera se consigue tener un amortiguador que se puede adaptar en cada momento a las exigencias de la vía implementando un sistema de control que regule el campo magnético para modificar la viscosidad del aceite. Este es el sistema de amortiguamiento que se utiliza para el estudio de la suspensión secundaria del vehículo ferroviario en el presente proyecto (Figura 3.6).



*Figura 3.6 - Amortiguador magnetorreológico [19]*

### 3.3 OTRA APLICACIONES DE LOS FMR

Las áreas de aplicaciones de los fluidos magnetorreológicos son muy diversas, entre ellas se pueden mencionar las siguientes [23]:

- **Robótica**

El sistema nervioso de los futuros robots puede utilizar fluidos magnetorreológicos para mover las articulaciones y extremidades de forma semejante a los seres vivos.

- **Sistema de amortiguación en vehículos pesados**

Un sistema de amortiguadores magnetorreológicos es la primera aplicación industrial de un fluido cuya viscosidad varía ante la presencia de un campo magnético. Con ese fluido, en lugar del que ordinariamente tienen los amortiguadores, la resistencia al movimiento del amortiguador se puede modificar hasta 1,000 veces por

segundo. El tiempo de respuesta es diez veces menor que el de los sistemas de amortiguación variable en los que se modifica el paso del aceite mediante electroválvulas. Una ventaja adicional del sistema de amortiguación magnetorreológica sobre las electroválvulas es que está acompañado de control electrónico más preciso.

La capacidad de cálculo y la programación del amortiguador magnetorreológico permiten, por ejemplo, distintas reacciones según la frecuencia de la vibración en la rueda. De esta manera, puede ser suave ante movimientos rápidos de la rueda (la suspensión deja de ser “blanda”) y firme en movimientos amplios de la carrocería (la suspensión debe ser “dura”). De hecho, la principal mejora del sistema de suspensión con amortiguadores magnetorreológicos con relación a uno con electroválvulas está en el rango de vibraciones, entre 1 y 4 Hz. La variación en la dureza del amortiguador es continua entre dos límites (no tiene posiciones fijas), porque depende en cierta medida de la intensidad del campo magnético que se le aplica (aunque no es directamente proporcional) [23].

- **Construcción civil**

Como se indicó la aplicación principal de los fluidos magnetorreológicos es la atenuación de las vibraciones. Una de las aplicaciones importantes en el mundo de la construcción es la atenuación de los movimientos producidos por los terremotos y las ráfagas de viento, y los fluidos magnetorreológicos pueden usarse para este fin [23].

- **Suspensiones de asientos en vehículos pesados**

La siguiente figura muestra un amortiguador de fluido magnetorreológico diseñado para utilizarse en un sistema de suspensión de asiento semi-activa en vehículos de carga para travesías largas [24].

### 3.4 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS FMR

Las ventajas de los FMR son varias. Muestran, bajo la acción de un campo magnético, una rápida variación en sus propiedades reológicas (de 15 a 25 milisegundos). Se rigen por la intensidad de corriente que genera el campo magnético. Sus rangos de voltaje son inferiores a 10 V y corrientes inferiores a 2 A pueden ser suficientes, lo cual permite contar, para el diseño del dispositivo, con fuentes normales de energía. Los fluidos magnetorreológicos son capaces de alcanzar valores altos de esfuerzos de cortadura (sobre 50-100 kPa), lo cual implica que solo es necesario activar una pequeña cantidad de fluido para llegar a las prestaciones requeridas. Esto afecta positivamente al tamaño y peso del diseño. No son muy sensibles a los contaminantes

e impurezas que pueden aparecer durante su fabricación y posterior uso. Esta misma insensibilidad del principio de funcionamiento hacia los contaminantes permite estabilizar los FMR frente a la sedimentación sin afectar por ello a sus propiedades magnetorreológicas. Se puede lograr un modo 'a prueba de fallos' en los dispositivos introduciendo imanes permanentes de manera que se active el FMR sin necesidad de otra fuente de energía. Son capaces de operar en un amplio rango de temperaturas, en base al fluido portador y se adaptan fácilmente a diferentes geometrías. Son apropiados para ser empleados en utillajes de piezas de geometría compleja, de piezas muy flexibles y de piezas que se van debilitando a medida que se van mecanizando [25].

En cuanto a los inconvenientes, los campos magnéticos no son fáciles de aplicar ni de usar. La intensidad de campo se ve afectada por la presencia de materiales férricos, son sistemas de suspensión pesados y requieren de espacio para albergar los electroimanes. La discordancia entre las densidades de la partícula metálica y el fluido portador es muy grande con lo que la tendencia a la sedimentación es alta. La alta densidad de la partícula también deriva en una alta densidad del FMR en conjunto (3-4 g/cm<sup>3</sup>). La viscosidad típica inicial (en ausencia de campo magnético) ya es relativamente alta, lo que conlleva una alta fricción o pérdidas de carga en dispositivos (como en los frenos rotatorios) cuando no se requiere su activación.

# 4. MODELOS DE AMORTIGUADORES

## MR

---

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Los modelos que actualmente existen se encuentran divididos en dos grandes grupos [29]:

- No paramétricos: los modelos no paramétricos son capaces de modelar el comportamiento del amortiguador magnetorreológico de tal manera que los parámetros del modelo no necesariamente tienen significados físicos. Aunque son capaces de representar eficazmente el comportamiento de los amortiguadores magnetorreológicos, son modelos de gran complejidad y requieren multitud de datos experimentales.

Dentro de los modelos no paramétricos cabe mencionar los siguientes:

- Polinomios de Chebyshev [36]
  - Redes neuronales [37]
  - Fuzzy neutro [38]
- Paramétricos: los parámetros poseen sentido físico, además constan de parámetros físicos conocidos como la viscosidad lineal, la fricción, expresiones propias de resortes y amortiguadores. Uno de los primeros modelos paramétricos fue el modelo de Bingham [35] al que posteriormente sustituyó el modelo Bouc-Wen como modelo más utilizado.

Dentro de la clasificación de los paramétricos, debe distinguirse a su vez entre: una primera categoría consistente en la solución de un modelo que tiene ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales, y una segunda categoría consiste en la evaluación de expresiones algebraicas (modelos algebraicos). Los modelos algebraicos son relativamente modernos, el modelo más sencillo fue el propuesto por Kwok [29] al que más tarde siguió el modelo propuesto por Guo y Hu con el que se descubrió que estos modelos podían capturar con exactitud el comportamiento lineal de los amortiguadores magnetorreológicos.

Entre los modelos paramétricos pertenecientes a la primera categoría cabe mencionar los siguientes:

- Modelo Bouc-Wen [29]

- Modelo Dahl [29]
- Modelo de fricción de LuGre modificado [29]

Entre los modelos paramétricos pertenecientes a la segunda categoría cabe mencionar los siguientes:

- Modelo de Kwok [29]
- Modelo algebraico [29]
- Modelo algebraico modificado [29]

Los dos modelos que se utilizan en el presente proyecto son los que se describen a continuación.

## 4.2 MODELO GENERAL DE BOUC-WEN

El modelo general de Bouc-Wen fue uno de los primeros y más usados para representar el comportamiento histérico de un sistema, el cual es extremadamente versátil y puede ajustarse a una gran variedad de comportamientos histéricos. Las ecuaciones del modelo creado por Spencer son las siguientes [29]:

$$F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z$$

donde la variable  $z$  se rige por la ecuación:

$$\dot{z} = -\gamma z |\dot{x}| |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x}$$

Según declaraciones de Spencer, mediante el ajuste de los parámetros  $\gamma$ ,  $\beta$  y  $A$ , se puede controlar la linealidad en la descarga y la uniformidad de la transición desde una zona de rendimiento a otra. La Figura 4.1 muestra como sería el modelo.

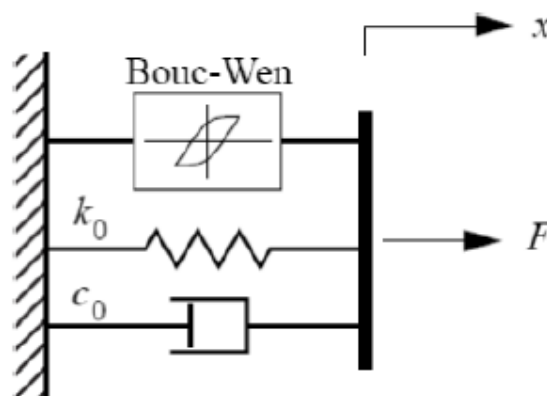


Figura 4.1 - Representación del modelo general de Bouc-Wen [29]

Dado que la respuesta fuerza-velocidad no lineal del modelo de Bouc-Wen no descarga en la región donde la aceleración y velocidad tienen signos opuestos y las magnitudes de las velocidades son pequeñas, Spencer propuso una modificación de su modelo a fin de predecir el comportamiento dinámico de un amortiguador magnetorreológico en esa región. El modelo que es expresado de la siguiente manera [34]:

$$F = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0)$$

donde la variable  $z$  viene dada por la expresión:

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y})$$

y donde:

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y) \}$$

En esta modificación del modelo, el acumulador de rigidez viene expresado por la variable  $k_1$ , y el amortiguamiento viscoso a grandes velocidades se representa con  $c_0$ . La constante  $c_1$  produciría la descarga a bajas velocidades,  $k_0$  está presente para controlar la rigidez a grandes velocidades y  $x_0$  es el desplazamiento inicial del muelle ( $k_1$ ), muelle asociado con la fuerza de amortiguación nominal debido al acumulador. La Figura 4.2 representa este modelo esquemáticamente.

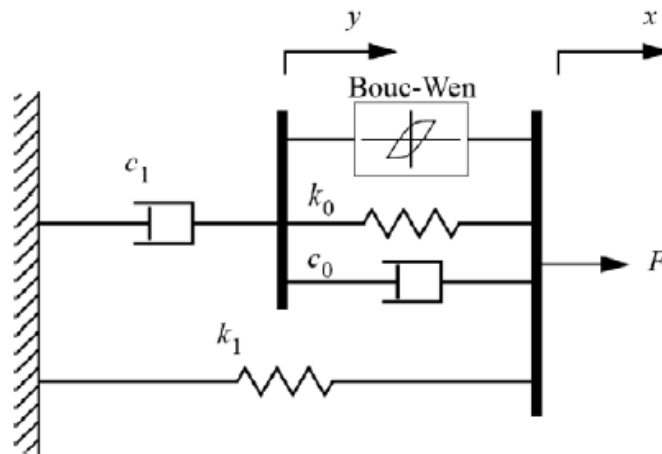


Figura 4.2 - Representación del modelo de Bouc-Wen modificado [29]



Spencer propuso posteriormente un modelo generalizado dependiente del voltaje a partir del anterior para tener en cuenta las fluctuaciones de las excitaciones y de los campos magnéticos. A partir de sus observaciones experimentales, concluyó que  $\alpha$ ,  $c_1$  y  $c_0$  varían linealmente con la tensión de entrada aplicada y proponen las siguientes relaciones [29]:

$$\alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u$$

$$c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u$$

$$c_0(u) = c_a + c_{0b} u$$

donde la dinámica en la que participa el fluido magnetorreológico alcanza el equilibrio reológico y se contabiliza a través del siguiente filtro de primer orden:

$$u = -\eta(u - v)$$

y  $v$  es el voltaje aplicado al conductor actual. Los valores óptimos de un total de 14 parámetros ( $c_{0a}$ ,  $c_{0b}$ ,  $k_0$ ,  $c_{1a}$ ,  $c_{1b}$ ,  $k_1$ ,  $x_0$ ,  $\alpha_a$ ,  $\alpha_b$ ,  $\gamma$ ,  $n$ ,  $\beta$ ,  $z$  y  $A$ ) tienen que ser estimados de forma que coincidan los datos experimentales y las predicciones del modelo de amortiguador magnetorreológico [29].

### 4.3 MODELO DE KWOK

Kwok hace uso de la función de la tangente hiperbólica para representar la histéresis, y de funciones lineales para representar la viscosidad y la resistencia del fluido magnetorreológico. Las ecuaciones del modelo son [29]:

$$F = c\dot{x} + kx + \alpha z + f_0$$

$$z = \tanh[\beta\dot{x} + \delta \operatorname{sgn}(x)]$$

donde  $c$  y  $k$  son las constantes de viscosidad y elasticidad,  $\alpha$  el factor de histéresis,  $z$  la variable de histéresis dada por la función hiperbólica de la tangente, y  $f_0$  es la compensación del amortiguador [29].

En la Figura 4.3 se muestra gráficamente la representación de este modelo.

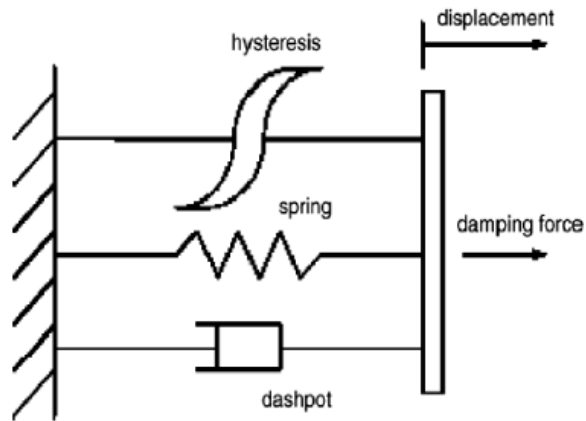


Figura 4.3 - Representación del modelo de Kwok [29]

Kwok señaló que su modelo era computacionalmente eficiente en el contexto de identificación de parámetros y la posterior inclusión en el diseño del controlador y la aplicación, al incluir únicamente una sencilla función tangente hiperbólica. En la Figura 4.4 se puede ver el efecto de cada parámetro en el ciclo de histéresis.

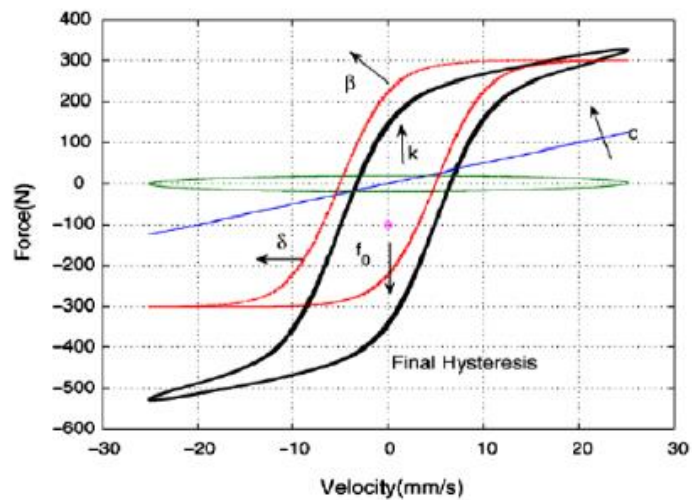


Figura 4.4 – Efecto de los parámetros de las ecuaciones de Kwok sobre el ciclo de histéresis [29]

#### 4.4 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS EN LAS SIMULACIONES DEL VEHÍCULO FERROVIARIO CON SIMPACK

Al comienzo de este proyecto, la intención era implementar un amortiguador basado en el modelo de Bouc-Wen dependiente del voltaje, pero al usar las ecuaciones de este modelo, han surgido multitud de errores durante las simulaciones dinámicas del vehículo ferroviario en Simpack, dando lugar a resultados inverosímiles y por lo tanto inservibles; además de que los tiempos de cálculo de las simulaciones eran muy

elevados. En el modelo de Bouc-Wen hay que resolver ecuaciones diferenciales que al resolverlas junto con SIMPACK da problemas. Por ello, se decide utilizar un modelo basado en ecuaciones algebraicas como es el modelo propuesto por Kwok.

Para implementar el modelo de Kwok se tienen que ajustar los parámetros del modelo para conseguir modelar el amortiguador dentro del mismo rango de trabajo para el que el modelo de Bouc-Wen ha sido optimizado en trabajos previos. De esta forma, usando ecuaciones más sencillas, se han eliminado los errores de cálculo mencionados anteriormente, además de reducir considerablemente los tiempos de las simulaciones en Simpack.

Para determinar los parámetros del modelo de Kwok que se ajustan lo mejor posible a los resultados de simulación obtenidos con el modelo de Bouc-Wen dependiente del voltaje, se han usado técnicas de optimización basadas en algoritmos genéticos, que básicamente se trata de un método adaptativo que puede usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. En el capítulo siguiente se describe en qué consisten los algoritmos genéticos. La función de Matlab utilizada que se basa en el uso de algoritmos genéticos y va permitir encontrar los valores de los parámetros del modelo de Kwok optimizado para el modelo de Bouc-Wen dependiente del voltaje es la siguiente:

$$[x,fval] = ga(\text{ObjectiveFunction},nvars,[],[],[],[],LB,UB,[], options)$$

Existen varios aspectos a tener en cuenta a la hora de usar esta función, pero hay que tener especial cuidado con uno en particular, y es que es necesario determinar unos límites de búsqueda para cada parámetro que acoten la solución optimizada. Se trata de definir los vectores *LB* y *UB* que aparecen en la función y que sirven para establecer un rango de búsqueda acotado, de tal manera que los cálculos que realice Matlab en búsqueda de la mejor solución no se alarguen demasiado en el tiempo. En el caso particular de este proyecto, se han definido estos límites con ayuda de un Excel programado con el que a base de ensayo y error se ha buscado asimilar gráficamente lo mejor posible el ciclo de histéresis de Kwok al de Bouc–Wen dependiente del voltaje, gracias a lo cual se ha obtenido un punto de partida para definir estos rangos de búsqueda.

# 5. ALGORITMOS GENÉTICOS

---

## 5.1 INTRODUCCIÓN

Los Algoritmos Genéticos son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza acorde a los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, postulados por Darwin (1859). Por imitación de este proceso, los Algoritmos Genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de las mismas [31].

Los principios básicos de los Algoritmos Genéticos fueron establecidos por Holland (1975). En la naturaleza los individuos de una población compiten entre sí en la búsqueda de recursos tales como comida, agua y refugio. Incluso los miembros de una misma especie compiten a menudo en la búsqueda de un compañero. Aquellos individuos que tienen más éxito en sobrevivir y en atraer compañeros tienen mayor probabilidad de generar un gran número de descendientes. Por el contrario individuos poco dotados producirán un menor número de descendientes. Esto significa que los genes de los individuos mejor adaptados se propagarán en sucesivas generaciones hacia un número de individuos creciente. La combinación de buenas características provenientes de diferentes ancestros, puede a veces producir descendientes con características extraordinarias, cuya adaptación es mucho mejor que la de cualquiera de sus ancestros. De esta manera, las especies evolucionan logrando unas características cada vez mejor adaptadas al entorno en el que viven.

Los Algoritmos Genéticos usan una analogía directa con el comportamiento natural que se acaba de explicar. Trabajan con una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado. A cada individuo se le asigna un valor o puntuación, relacionado con la bondad de dicha solución. En la naturaleza esto equivaldría al grado de efectividad de un organismo para competir por unos determinados recursos. Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de igual forma. Este cruce producirá nuevos individuos (descendientes de los anteriores) los cuales compartirán algunas de las características de sus padres. Cuanto menor sea la adaptación de un individuo, menor será la probabilidad de que dicho individuo sea seleccionado para la reproducción, y por tanto de que su material genético se

propague en sucesivas generaciones. De esta manera se produce una nueva población de posibles soluciones, la cual reemplaza a la anterior y verifica la interesante propiedad de que contiene una mayor proporción de buenas características en comparación con la población anterior. Así a lo largo de las generaciones las buenas características se propagan a través de la población. Favoreciendo el cruce de los individuos mejor adaptados, van siendo exploradas las áreas más prometedoras del espacio de búsqueda. Si el Algoritmo Genético ha sido bien diseñado, la población convergirá hacia una solución óptima del problema [31].

El poder de los Algoritmos Genéticos proviene del hecho de que se trata de una técnica robusta, y pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas, incluyendo aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades. Si bien no se garantiza que el Algoritmo Genético encuentre la solución óptima del problema, existe evidencia empírica de que se encuentran soluciones de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo con el resto de algoritmos de optimización combinatoria. En el caso de que existan técnicas especializadas para resolver un determinado problema, lo más probable es que superen al Algoritmo Genético, tanto en rapidez como en eficacia. El gran campo de aplicación de los Algoritmos Genéticos se relaciona con aquellos problemas para los cuales no existen técnicas especializadas. Incluso en el caso en que dichas técnicas existan, y funcionen bien, pueden efectuarse mejoras de las mismas hibridándolas con los Algoritmos Genéticos.

## 5.2 EL ALGORITMO GÉNÉTICO SIMPLE

El Algoritmo Genético Simple, también denominado Canónico, se representa en la Figura 5.1. Como luego se ve, se necesita una codificación o representación del problema, que resulte adecuada al mismo. Además se requiere una función de ajuste o adaptación al problema, la cual asigna un número real a cada posible solución codificada. Durante la ejecución del algoritmo, los padres deben ser seleccionados para la reproducción y después se cruzarán dichos padres seleccionados generando dos hijos, sobre cada uno de los cuales actuará un operador de mutación. El resultado es un nuevo conjunto de individuos (posibles soluciones al problema), los cuales en la evolución del Algoritmo Genético formarán parte de la siguiente población [31].

```

BEGIN /* Algoritmo Genetico Simple */
  Generar una poblacion inicial.
  Computar la funcion de evaluacion de cada individuo.
  WHILE NOT Terminado DO
    BEGIN /* Producir nueva generacion */
      FOR Tamaño poblacion/2 DO
        BEGIN /*Ciclo Reproductivo */
          Seleccionar dos individuos de la anterior generacion,
          para el cruce (probabilidad de seleccion proporcional
          a la funcion de evaluacion del individuo).
          Cruzar con cierta probabilidad los dos
          individuos obteniendo dos descendientes.
          Mutar los dos descendientes con cierta probabilidad.
          Computar la funcion de evaluacion de los dos
          descendientes mutados.
          Insertar los dos descendientes mutados en la nueva generacion.
        END
      IF la poblacion ha convergido THEN
        Terminado := TRUE
      END
    END
  END
END

```

*Figura 5.1 - Pseudocódigo del Algoritmo Genético Simple [31]*

### 5.2.1 CODIFICACIÓN

Se supone que los individuos (posibles soluciones del problema), pueden representarse como un conjunto de parámetros (que denominaremos genes), los cuales agrupados forman una ristra de valores (a menudo referida como cromosoma). Si bien el alfabeto utilizado para representar los individuos no debe necesariamente estar constituido por el  $[0; 1]$ , buena parte de la teoría en la que se fundamentan los Algoritmos Genéticos utiliza dicho alfabeto.

La función de adaptación debe ser diseñada para cada problema de manera específica. Dado un cromosoma particular, la función de adaptación le asigna un número real, que se supone refleja su nivel de adaptación al problema [31].

Durante la fase reproductiva se seleccionan los individuos de la población para cruzarse y producir descendientes, que constituirán, una vez mutados, la siguiente generación de individuos. La selección de padres se efectuará al azar usando un procedimiento que favorezca a los individuos mejor adaptados, ya que a cada individuo se le asigna una probabilidad de ser seleccionado que es proporcional a su función de adaptación. Este procedimiento se dice que está basado en la ruleta sesgada. Según dicho esquema, los individuos bien adaptados se escogerán probablemente varias veces por generación, mientras que los pobremente adaptados

al problema, no se escogerán más que de vez en cuando. Una vez seleccionados dos padres, sus cromosomas se combinan, utilizando habitualmente los operadores de cruce y mutación. Las formas básicas de dichos operadores se describen más adelante. El operador de cruce, coge dos padres seleccionados y corta sus ristas de cromosomas en una posición escogida al azar, para producir dos subristras iniciales y dos subristras finales. Después se intercambian las subristras iniciales, produciéndose dos nuevos cromosomas completos (Figura 5.2).

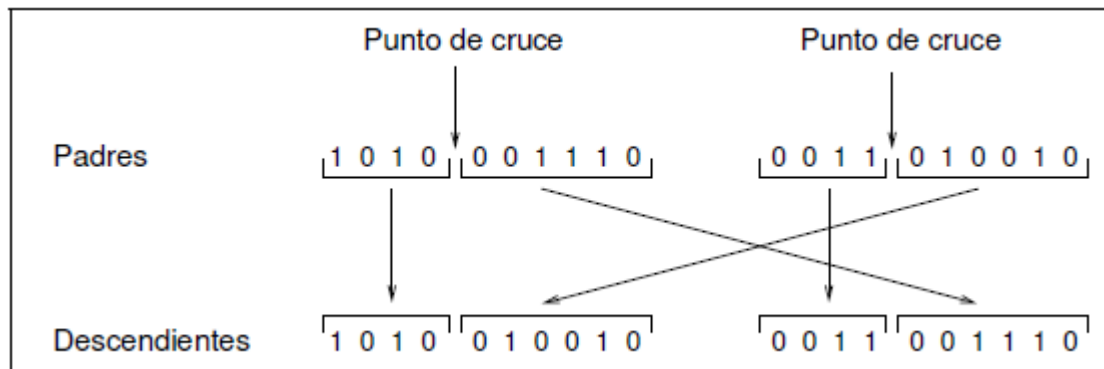


Figura 5.2 – Operador de cruce basado en un punto [31]

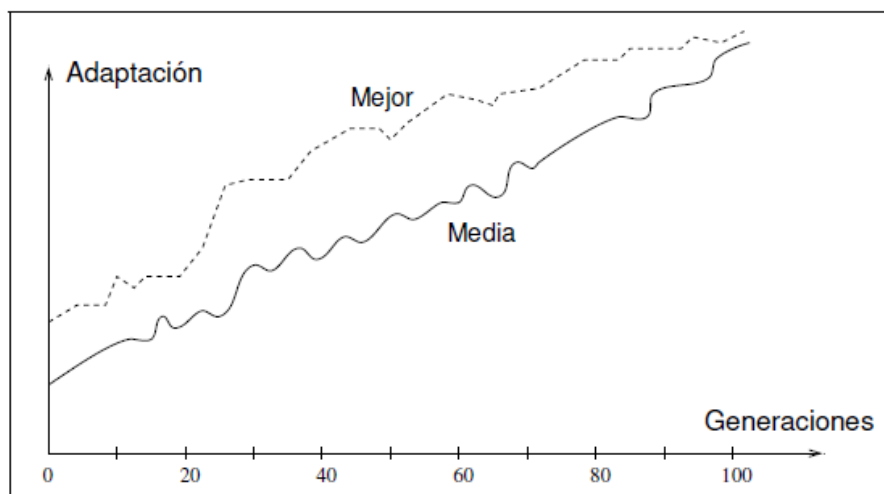
Ambos descendientes heredan genes de cada uno de los padres. Este operador se conoce como operador de cruce basado en un punto. Habitualmente el operador de cruce no se aplica a todos los pares de individuos que han sido seleccionados para emparejarse, sino que se aplica de manera aleatoria, normalmente con una probabilidad comprendida entre el 50% y el 100%. En el caso en que el operador de cruce no se aplique, la descendencia se obtiene simplemente duplicando los padres. El operador de mutación se aplica a cada hijo de manera individual, y consiste en la alteración aleatoria (normalmente con probabilidad pequeña) de cada gen componente del cromosoma. La Figura 5.3 muestra la mutación del quinto gen del cromosoma que se ha tomado como ejemplo.



Figura 5.3 – Operador de mutación [31]

Si bien puede pensarse en principio que el operador de cruce es más importante que el operador de mutación, ya que proporciona una exploración rápida del espacio de búsqueda, este último asegura que ningún punto del espacio de búsqueda tenga probabilidad cero de ser examinado, y es de importancia suprema para asegurar la convergencia de los Algoritmos Genéticos. Para criterios prácticos, es muy útil la definición de convergencia introducida en este campo por De Jong (1975) en su tesis doctoral. Si el Algoritmo Genético ha sido correctamente implementado, la población evolucionará a lo largo de las generaciones sucesivas de tal manera que la adaptación media extendida a todos los individuos de la población, así como la adaptación del mejor individuo, se irán incrementando hacia el óptimo global. El concepto de convergencia está relacionado con la progresión hacia la uniformidad; un gen ha convergido cuando al menos el 95 % de los individuos de la población comparten el mismo valor para dicho gen. Se dice que la población converge cuando todos los genes han convergido. Se puede generalizar dicha definición al caso en que al menos un % de los individuos de la población hayan convergido [31].

La Figura 5.4 muestra como varía la adaptación media y la mejor adaptación en un Algoritmo Genético Simple típico. A medida que el número de generaciones aumenta, es más probable que la adaptación media se aproxime a la del mejor individuo.



*Figura 5.4 – “Adaptación media” frente a “Mejor Adaptación” en un Algoritmo Genético Simple [31]*



## 5.3 POBLACIÓN

### 5.3.1 TAMAÑO DE LA POBLACIÓN

Una cuestión que uno puede plantearse es la relacionada con el tamaño idóneo de la población. Parece intuitivo que las poblaciones pequeñas corren el riesgo de no cubrir adecuadamente el espacio de búsqueda, mientras que el trabajar con poblaciones de gran tamaño puede acarrear problemas relacionados con el excesivo costo computacional. Goldberg (1989) efectuó un estudio teórico, obteniendo como conclusión que el tamaño óptimo de la población para ristas de longitud  $l$ , con codificación binaria, crece exponencialmente con el tamaño de la rista. Este resultado traerá como consecuencia que la aplicabilidad de los Algoritmos Genéticos en problemas reales será muy limitada, ya que resultarán no competitivos con otros métodos de optimización combinatoria. Alander (1992), basándose en evidencia empírica sugiere que un tamaño de población comprendida entre  $l$  y  $2l$  es suficiente para atacar con éxito los problemas por él considerados [31].

### 5.3.2 TAMAÑO INICIAL

Habitualmente la población inicial se escoge generando ristas al azar, pudiendo contener cada gen uno de los posibles valores del alfabeto con probabilidad uniforme. Podría preguntarse qué es lo que sucederá si los individuos de la población inicial se obtuviesen como resultado de alguna técnica heurística o de optimización local. En los pocos trabajos que existen sobre este aspecto, se constata que esta inicialización no aleatoria de la población inicial, puede acelerar la convergencia del Algoritmo Genético. Sin embargo en algunos casos la desventaja resulta ser la prematura convergencia del algoritmo, queriendo indicar con esto la convergencia hacia óptimos locales [31].

## 5.4 FUNCIÓN OBJETIVO

Dos aspectos que resultan cruciales en el comportamiento de los Algoritmos Genéticos son la determinación de una adecuada función de adaptación o función objetivo, así como la codificación utilizada. Idealmente nos interesaría construir funciones objetivo con ciertas regularidades, es decir funciones objetivo que verifiquen que para dos individuos que se encuentren cercanos en el espacio de búsqueda, sus

respectivos valores en las funciones objetivo sean similares. Por otra parte, una dificultad añadida al comportamiento del Algoritmo Genético puede ser la existencia de gran cantidad de óptimos locales, así como el hecho de que el óptimo global se encuentre muy aislado.

La regla general para construir una buena función objetivo es que debe reflejar el valor del individuo de una manera real, pero en muchos problemas de optimización combinatoria, donde existen gran cantidad de restricciones, buena parte de los puntos del espacio de búsqueda representan individuos no válidos [31].

Para este planteamiento en el que los individuos están sometidos a restricciones, se han propuesto varias soluciones. La primera sería la que podríamos denominar absolutista, en la que aquellos individuos que no verifican las restricciones, no son considerados como tales, y se siguen efectuando cruces y mutaciones hasta obtener individuos válidos, o bien a dichos individuos se les asigna una función objetivo igual a cero.

Otra posibilidad consiste en reconstruir aquellos individuos que no verifican las restricciones. Dicha reconstrucción suele llevarse a cabo por medio de un nuevo operador que se acostumbra a denominar reparador [31].

Otro enfoque está basado en la penalización de la función objetivo. La idea general consiste en dividir la función objetivo del individuo por un valor (la penalización) que guarda relación con las restricciones que dicho individuo viola. Dicha valor puede simplemente tener en cuenta el número de restricciones violadas o bien el denominado costo esperado de reconstrucción, es decir el coste asociado a la conversión de dicho individuo en otro que no viole ninguna restricción. Otra técnica que se ha venido utilizando en el caso en que la computación de la función objetivo sea muy compleja es la denominada evaluación aproximada de la función objetivo. En algunos casos la obtención de varias funciones objetivo aproximadas puede resultar mejor que la evaluación exacta de una única función objetivo.

Un problema habitual en las ejecuciones de los Algoritmos Genéticos surge debido a la velocidad con la que el algoritmo converge. En algunos casos la convergencia es muy rápida, lo que suele denominarse convergencia prematura, en la cual el algoritmo converge hacia óptimos locales, mientras que en otros casos el problema es justo el contrario, es decir se produce una convergencia lenta del algoritmo. Una posible solución a estos problemas pasa por efectuar transformaciones en la función objetivo. El problema de la convergencia prematura, surge a menudo cuando la selección de individuos se realiza de manera proporcional a su función objetivo. En tal caso, pueden existir individuos con una adaptación al problema muy superior al resto, que a medida que avanza el algoritmo dominan a la población. Por medio de una transformación de la función objetivo, en este caso una comprensión del

rango de variación de la función objetivo, se pretende que dichos “superindividuos” no lleguen a dominar a la población [31].

El problema de la lenta convergencia del algoritmo, se resolverá de manera análoga, pero en este caso efectuando una expansión del rango de la función objetivo.

## 5.5 SELECCION

La función de selección de padres más utilizada, es la denominada función de selección proporcional a la función objetivo, en la que cada individuo tiene una probabilidad de ser seleccionado como padre que es proporcional al valor de su función objetivo [31].

Una de las maneras de superar el problema relacionado con la rápida convergencia proveniente de los superindividuos, que surge al aplicar la anterior función de selección, es el efectuar la selección proporcional al rango del individuo, con lo cual se produce una repartición más uniforme de la probabilidad de selección.

En el modelo de selección elitista se fuerza a que el mejor individuo de la población sea seleccionado como padre.

La selección por torneo, constituye un procedimiento de selección de padres muy extendido y en el cual la idea consiste en escoger al azar un número de individuos de la población, tamaño del torneo, seleccionar el mejor individuo de este grupo, y repetir el proceso hasta que el número de individuos seleccionados coincida con el tamaño de la población. Habitualmente el tamaño del torneo es 2, y en tal caso se ha utilizado una versión probabilística en la cual se permite la selección de individuos sin que necesariamente sean los mejores [31].

Una posible clasificación de procedimientos de selección de padres podría ser: métodos de selección dinámicos, en los cuales las probabilidades de selección varían de generación a generación; y métodos de selección estáticos, en los cuales dichas probabilidades permanecen constantes.

Si se asegura que todos los individuos tienen asignada una probabilidad de selección distinta de cero el método de selección se denomina preservativo. En caso contrario se acostumbra a denominarlo extintivo.

## 5.6 CRUCE

Dos individuos seleccionados para jugar el papel de padres, son recombinados por medio de la selección de un punto de corte, para posteriormente intercambiar las secciones que se encuentran a la derecha de dicho punto.

Se han investigado otros operadores de cruce, habitualmente teniendo en cuenta más de un punto de cruce. De Jong investigó el comportamiento del operador de cruce basado en múltiples puntos, concluyendo que el cruce basado en dos puntos representaba una mejora, mientras que añadir más puntos de cruce no beneficiaba el comportamiento del algoritmo. La ventaja de tener más de un punto de cruce radica en que el espacio de búsqueda puede ser explorado más fácilmente, siendo la principal desventaja el hecho de aumentar la probabilidad de ruptura de buenos esquemas [31].

En el operador de cruce basado en dos puntos, los cromosomas (individuos) pueden contemplarse como un circuito en el cual se efectúa la selección aleatoria de dos puntos, tal y como se indica en la Figura 5.5.

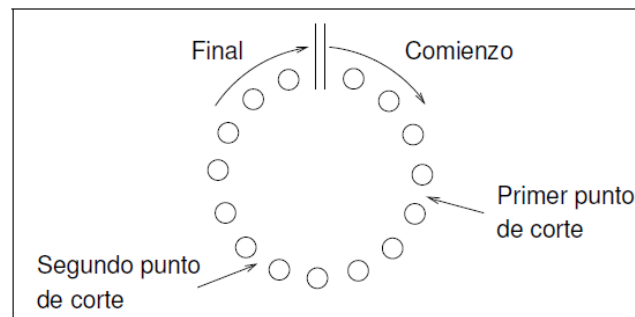


Figura 5.5 – Individuo visto como un circuito [31]

Desde este punto de vista, el cruce basado en un punto puede verse como un caso particular del cruce basado en dos puntos, en el cual uno de los puntos de corte se encuentra fijo al comienzo de la ristra que representa al individuo (Figura 5.6).

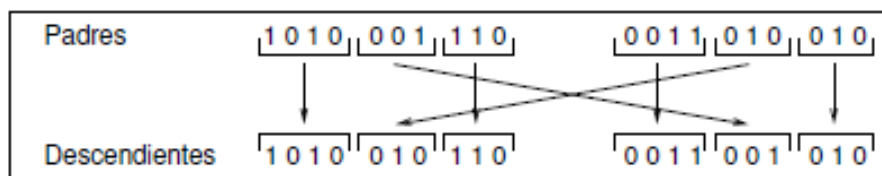


Figura 5.6 – Operador de cruce basado en dos puntos [31]

En el denominado operador de cruce uniforme, cada gen en la descendencia se crea copiando el correspondiente gen de uno de los dos padres, escogido de acuerdo a una "máscara de cruce" generada aleatoriamente. Cuando existe un 1 en la "máscara de cruce", el gen es copiado del primer padre, mientras que cuando exista un 0 en la "máscara de cruce", el gen se copia del segundo padre, tal y como se muestra en el ejemplo de la Figura 5.7.

Máscara de cruce	1	0	0	1	0	0	1
Padre 1	1	1	0	1	1	0	1
	↓			↓			↓
Descendiente	1	0	0	1	1	1	1
		↑	↑		↑	↑	
Padre 2	0	0	0	1	1	1	0

*Figura 5.7 – Operador de cruce uniforme [31]*

## 5.7 MUTACIÓN

La mutación se considera un operador básico, que proporciona un pequeño elemento de aleatoriedad en el entorno de los individuos de la población. Si bien se admite que el operador de cruce es el responsable de efectuar la búsqueda de posibles soluciones a lo largo del espacio, también parece llegarse a la conclusión a partir de los experimentos efectuados por varios investigadores, que el operador de mutación va ganando en importancia a medida que la población de individuos va convergiendo.

La búsqueda del valor óptimo para la probabilidad de mutación, es una cuestión que ha sido motivo de varios trabajos. Si bien en la mayoría de las implementaciones de Algoritmos Genéticos se asume que tanto la probabilidad de cruce como la de mutación permanecen constantes, algunos autores han obtenido mejores resultados experimentales modificando la probabilidad de mutación a medida que aumenta el número de iteraciones [31].

## 5.8 REDUCCIÓN

Una vez obtenidos los individuos descendientes de una determinada población en el tiempo  $t$ , debe reducirse el tamaño de la población resultante al número de individuos original de partida. Dicho proceso se suele hacer fundamentalmente de dos formas distintas. O bien todos los descendientes son los que forman parte de la población en el tiempo  $t + 1$ , es lo que se denomina reducción simple, o bien se escogen de entre los todos los individuos, los que estén mejor adaptados al problema, lo que podemos denominar un criterio de reducción elitista [31].

El concepto de reducción está ligado con el de tasa de reemplazamiento generacional, es decir en el porcentaje de hijos generados con respecto del tamaño de la población [31].

De Jong introdujo el concepto de tasa de reemplazamiento generacional con el objetivo de efectuar un solapamiento controlado entre padres e hijos. En su trabajo, en cada paso una proporción de la población es seleccionada para ser cruzada. Los hijos resultantes podrán reemplazar a miembros de la población anterior.

Michalewicz introduce un algoritmo que denomina Algoritmo Genético Modificado, en el cual para llevar a cabo el reemplazamiento generacional, selecciona al azar  $r_1$  individuos para la reproducción, así como  $r_2$  individuos (distintos de los anteriores) destinados a morir. Estas selecciones aleatorias tienen en consideración el valor de la función objetivo de cada individuo, de tal manera que cuanto mayor es la función objetivo, mayor es la probabilidad de que sea seleccionado para la reproducción, y menor es la probabilidad de que dicho individuo fallezca. El resto de los individuos (los que no pertenecen a los grupos  $r_1$  y  $r_2$ ) son considerados como neutros y pasan directamente a formar parte de la población en la siguiente generación [31].

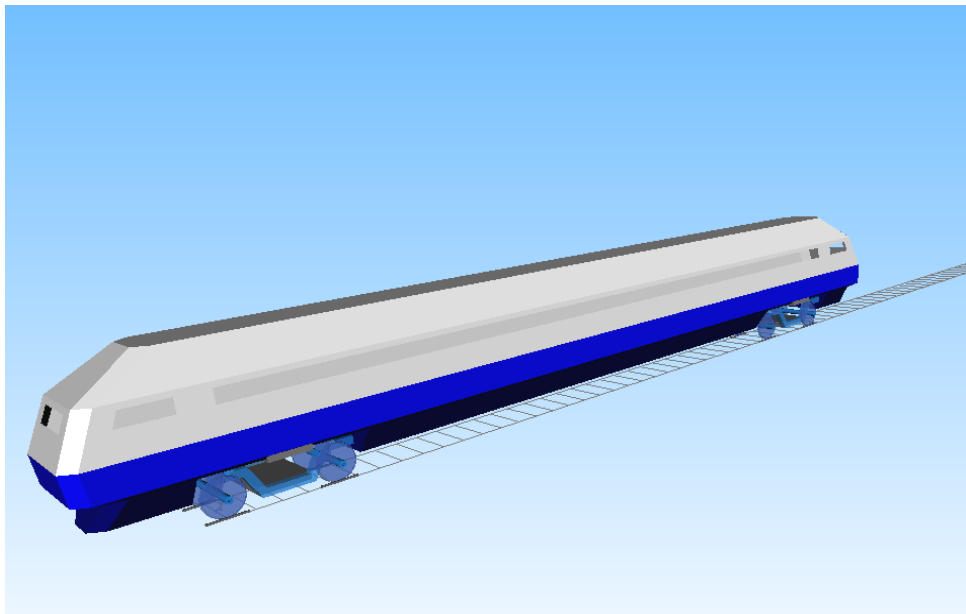
## 6. MODELADO DEL VEHÍCULO FERROVIARIO CON SIMPACK

---

Simpack es un software de simulación de múltiples cuerpos, cuyo propósito general es el análisis dinámico de cualquier sistema mecánico, lo que permite a los ingenieros generar y resolver modelos 3D virtuales con el fin de predecir y visualizar el movimiento, fuerzas de acoplamiento y tensiones, reduciéndose la necesidad de crear prototipos físicos y los tiempos de ensayos y pruebas. En esencia Simpack permite a los fabricantes obtener una ventaja competitiva al ofrecer la capacidad de crear productos de alta calidad en un corto periodo de tiempo y de manera eficiente, reduciendo así los costes generales en el proceso diseño, fabricación y mantenimiento [30].

Este Software se utiliza principalmente en la industria automotriz, motor, transmisión de energía, ferrocarril, y el sector de la energía eólica, pero se puede aplicar a cualquier rama de la ingeniería mecánica en general. En el caso de este proyecto, se ha utilizado para modelar el sistema de suspensión de un tren (suspensión primaria y secundaria) a partir del cual se han llevado a cabo ensayos dinámicos con el fin de realizar el análisis del comportamiento de una suspensión secundaria semi-activa, cuyo funcionamiento está basado en las propiedades de los fluidos magnetorreológicos.

En la Figura 6.1 se puede observar el tren modelado en Simpack que se ha usado para realizar las simulaciones dinámicas de la suspensión secundaria.



*Figura 6.1 – Tren modelado con Simpack*

Además de tener en cuenta la dinámica y el control interno del sistema, Simpack también puede considerar cualquier influencia externa sobre el mismo, por ejemplo, alteraciones del terreno y la carga aerodinámica. Simpack es destaca especialmente en el análisis de alta frecuencia transitoria, permitiendo también llevar a cabo análisis estáticos, cuasi-estáticos y dinámicos.

Este programa se compone de tres módulos:

- **Pre-processor:** es el preprocesador que permite a los usuarios construir modelos a partir de cero mediante el uso la gran variedad de elementos básicos de modelado que incluye. De esta manera se pueden crear modelos básicos para llevar a cabo el análisis de fenómenos dinámicos generales. Se requiere de este módulo para la mayoría de otros módulos. A continuación se describen algunos de los elementos básicos que se usan para el modelado de cuerpos como el que se muestra en la Figura 6.2 [30]:

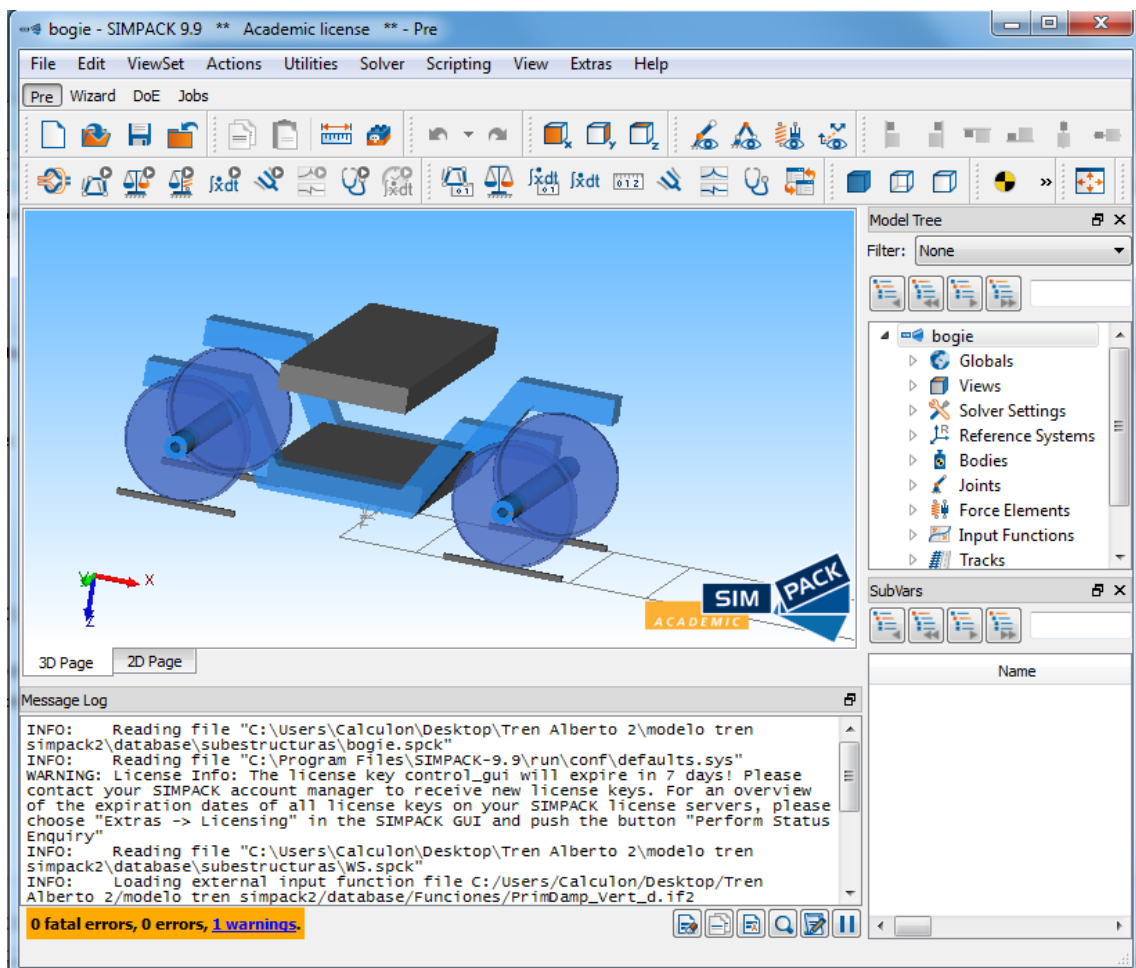


Figura 6.2 – Interface del módulo Pre-processor



“Bodies”: los cuerpos son los elementos básicos que constituyen el modelo. A través de su ventana de propiedades se puede modificar todo tipo de características, como la posición, dimensiones, masa, inercia y aspectos estéticos entre otros.

“Joints”: Las articulaciones son los elementos de modelado sin masa utilizados para conectar cuerpos entre sí a un sistema de referencia. Proporcionan grados mecánicos de libertad e introducen fuerzas y momentos en las direcciones restringidas de la articulación.

“Constraints”: Las restricciones son elementos de modelado sin masa utilizados para conectar cinemáticamente cuerpos entre sí o a un Sistema de Referencia. Al contrario que las articulaciones, restringen grados cinemáticos de la libertad. En las direcciones restringidas, introducen fuerzas de restricción y pares de torsión en el modelo.

“Force Element”: son elementos de modelado sin masa que se utilizan para modelar los componentes del sistema o interacciones por las leyes de fuerza. Se introducen las fuerzas y pares de torsión aplicados en el modelo.

“Control Element”: los elementos de control proporcionan funciones básicas y avanzadas de procesamiento de señales y control. Además, hay elementos de control especializados que describen los dispositivos con mecanismos de control incorporados.

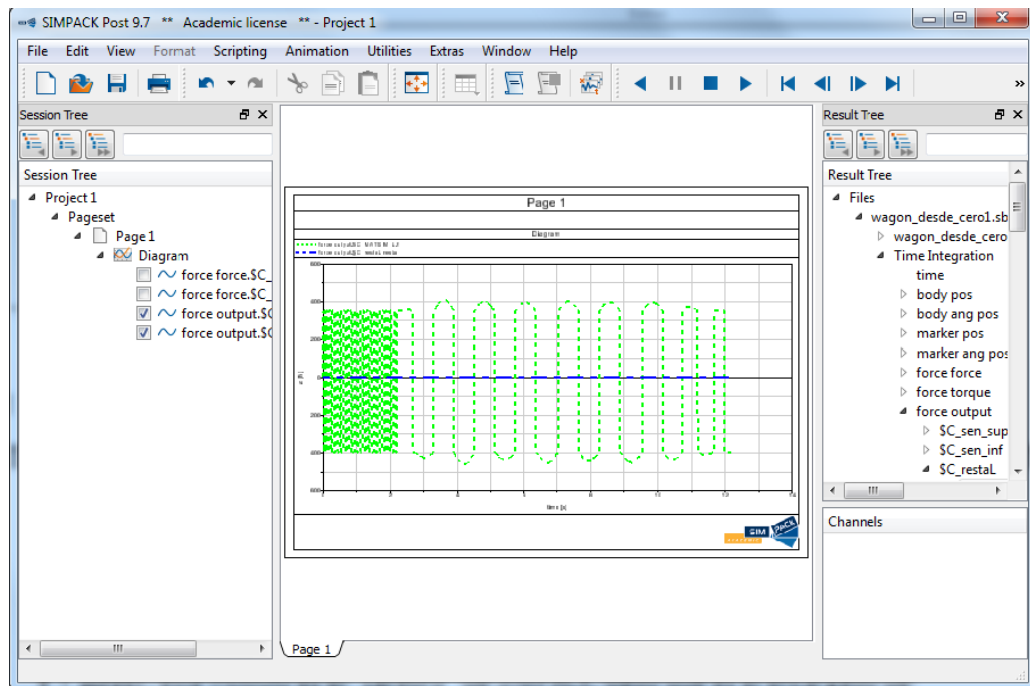
“Sensors”: los sensores proporcionan una manera fácil de medir distancias y ángulos, incluyendo las velocidades y aceleraciones de los puntos en los que se sitúan.

“Tracks”: estos elementos definen el camino por el que circula el vehículo. Se pueden modificar para disponer tramos rectos, curvos o las irregularidades del trazado

“Substructures”: Una subestructura es el elemento de modelado utilizado para hacer referencia a un modelo (submodelo) dentro de otro modelo (padre). Las subestructuras permiten una construcción modular de todo el modelo como diferentes componentes de todo el modelo definidos en diferentes modelos.

“SubVars”: las subvariables se utilizan para la parametrización de los datos. En lugar de asignar los datos de forma explícita, se le asigna una subvariable. Éstas se pueden definir en el modelo o hacer referencia desde un archivo de subvariable.

- **Post-processor:** Simpack Post se requiere para la visualización de los resultados simulados. Visualizaciones 2D, gráficos 3D y animaciones en 3D se pueden generar fácilmente (Figura 6.3). Una amplia biblioteca de filtros permite un fácil procesamiento de datos [30].



*Figura 6.3 – Interface del módulo Post-processor*

• **Solver:** este módulo es el “cerebro” de Simpack, dado que es el encargado de usar la potencia de cálculo del programa para generar un archivo con los resultados de las simulaciones del modelo que se ha diseñado en el módulo Pre-processor [30].

Es necesario hablar de una herramienta adicional que ofrece trabajar con este programa y que se ha usado para llevar a cabo las simulaciones del vehículo ferroviario. Y es que Simpack permite interactuar con otros programas como MATLAB, siendo posible exportar modelos de uno a otro programa con la herramienta adecuada.

Simat y Matsim, son las herramientas que posibilitan la tecnología de interfaz adecuada para cualquier tarea de simulación mecatrónica. Modelos de Simpack pueden ser exportados como modelos de Matlab o viceversa. Además, estas herramientas permiten usar las potencias de cálculo de ambos programas en conjunto a través de un co-simulación. Se podría decir que Simpack sería el eslabón perdido entre Simulink y programas de FEA / CAD.

Una vez que ya se ha realizado el modelado del vehículo ferroviario general en Simpack, se modifica el sistema de suspensión secundaria para que sean amortiguadores magnetorreológicos y se comporte según el modelo de amortiguación que se desee, para ello se recurre al tipo de actuador (o amortiguador) “Proportional Actuator Cmp”, lo que permite que su comportamiento se adapte al modelo de amortiguamiento a partir de un “Control Elements”, elemento al cuál se permite exportar archivos generados con Matsim.

Es necesario hacer en este punto una apreciación importante sobre la necesidad de usar un “comando especial” en la construcción de las ecuaciones con Simulink para que se realice correctamente la generación del archivo. Simpack es un programa que trabaja con tiempo discreto, es decir, para realizar la simulación hace los cálculos pertinentes cada cierto intervalo de tiempo, lo que significa que no puede trabajar con entradas que sean continuas. Por eso ha sido necesaria la discretización de las ecuaciones del modelo de amortiguación por las que la suspensión registrará su comportamiento. Para llevar a cabo esta discretización de las ecuaciones se usa el comando *Zero-Order Hold* de Simulink. Básicamente lo que hace este comando se puede ver gráficamente en la Figura 6.4.

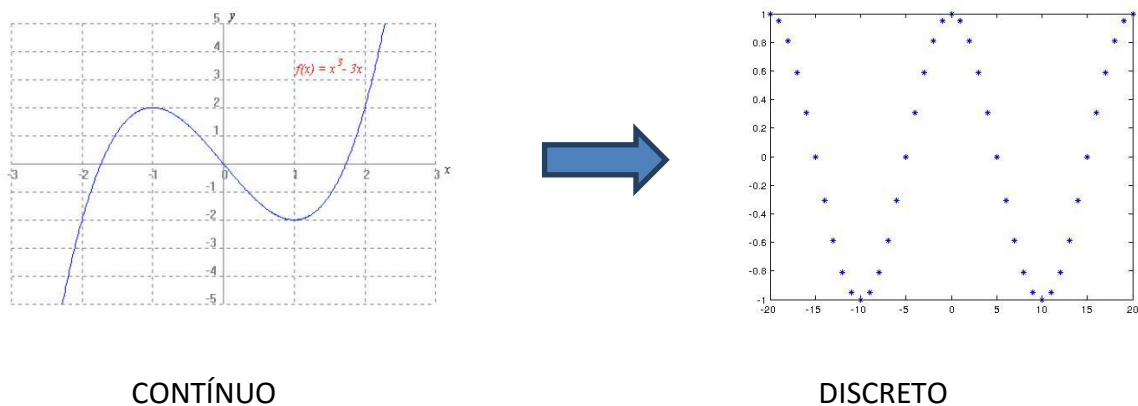


Figura 6.4 – Discretización

Otro aspecto importante a la hora de usar el comando *Zero-Order Hold* es ajustar correctamente el tiempo entre cada registro para realizar la discretización (Figura 6.5), el cuál debe ser menor o igual que el tiempo que toma Simpack para realizar los cálculos de la simulación en cada intervalo.

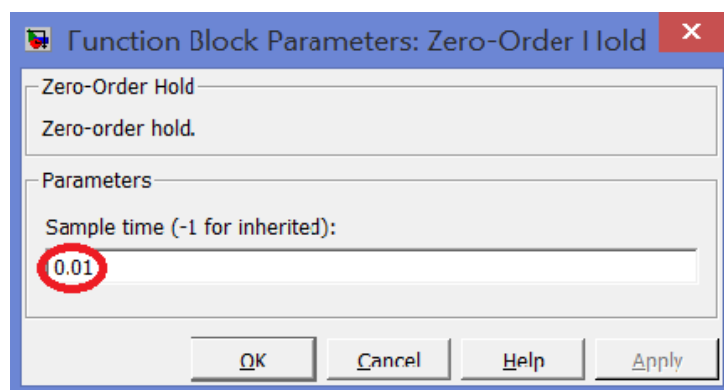


Figura 6.5 - Ventana para el ajuste del tiempo de discretización

## 7. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos tras realizar las simulaciones dinámicas del vehículo ferroviario con el software Simpack.

Se debe encontrar unos parámetros del modelo de Bouc-Wen que se adapten lo mejor posible al comportamiento de la suspensión secundaria de un vehículo ferroviario, ya que estos valores son diferentes dependiendo del tipo de vehículo, su masa, etc. Es necesario decir que los trece parámetros de las ecuaciones del modelo de Bouc-Wen se determinan a partir de múltiples ensayos reales hasta llegar a su optimización, por ello, los parámetros que se utilizan para nuestro modelo han sido obtenidos de artículos científicos publicados que exponen los resultados de sus ensayos para vehículos ferroviarios [32] y que se presentan en la Tabla 7.1. En las Figuras 7.1 y 7.2 se muestran respectivamente el ciclo de histéresis y la gráfica de fuerza frente a tiempo pertenecientes al modelo de Bouc-Wen dependiente del voltaje con los parámetros mostrados en la Tabla 7.1.

Parámetros	$\gamma$ 1/m <sup>2</sup>	a	$\beta$ 1/m <sup>2</sup>	$K_0$ N/m	$C_{1a}$ Ns/m	$C_{1b}$ Ns/Vm	$C_{0a}$ Ns/m	$C_{0b}$ Ns/Vm	$\alpha_a$ N/m	$\alpha_b$ N/Vm	$\eta$ 1/s	$x_0$ m	$K_1$ N/m	n
Valor	136320	58	2059020	3610	14649	34649	784	1803	12441	38430	-190	0.0245	840	2

Tabla 7.1 – Parámetros de Bouc-Wen

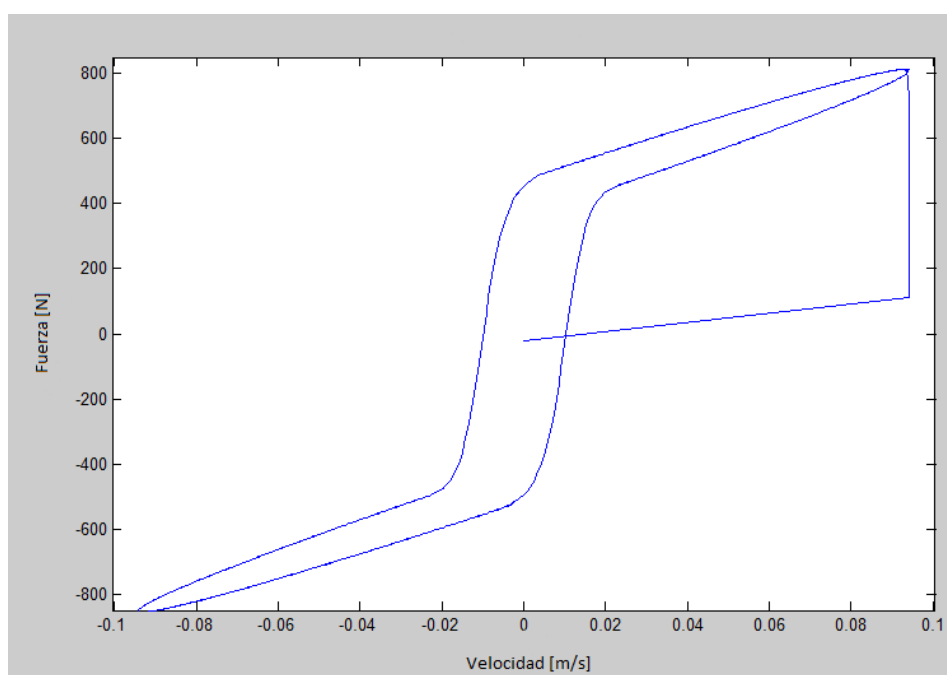
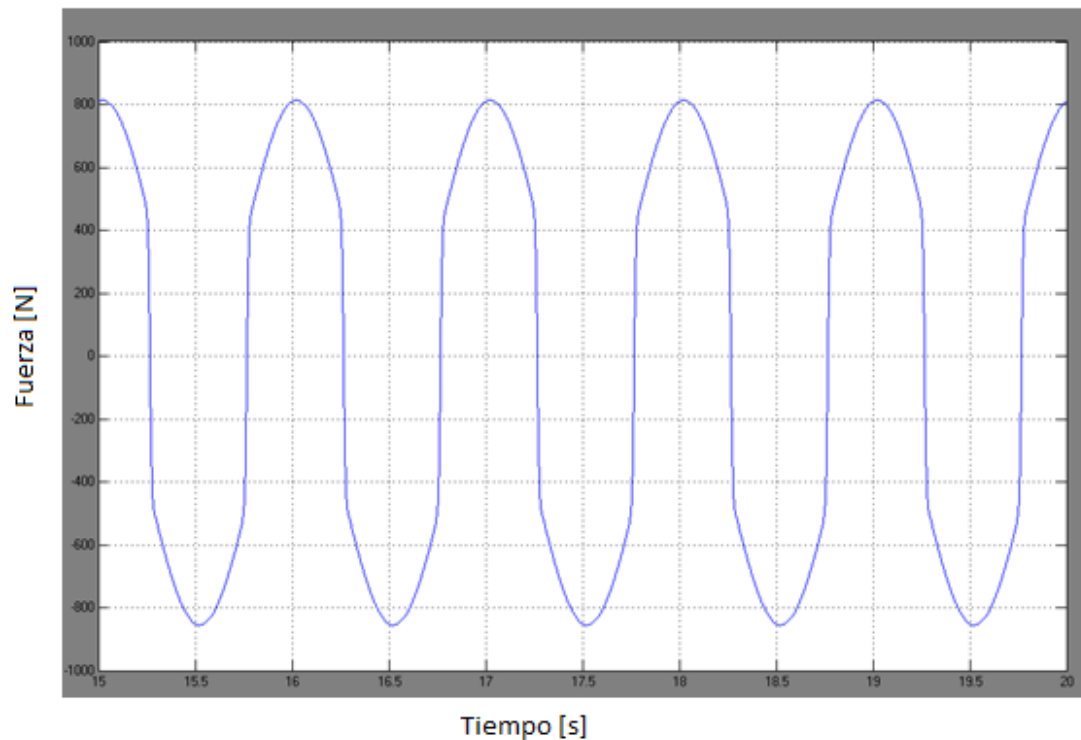


Figura 7.1 - Ciclo de histéresis



*Figura 7.2 – Respuesta de las ecuaciones de Bouc-Wen. Fuerza frente a tiempo.*

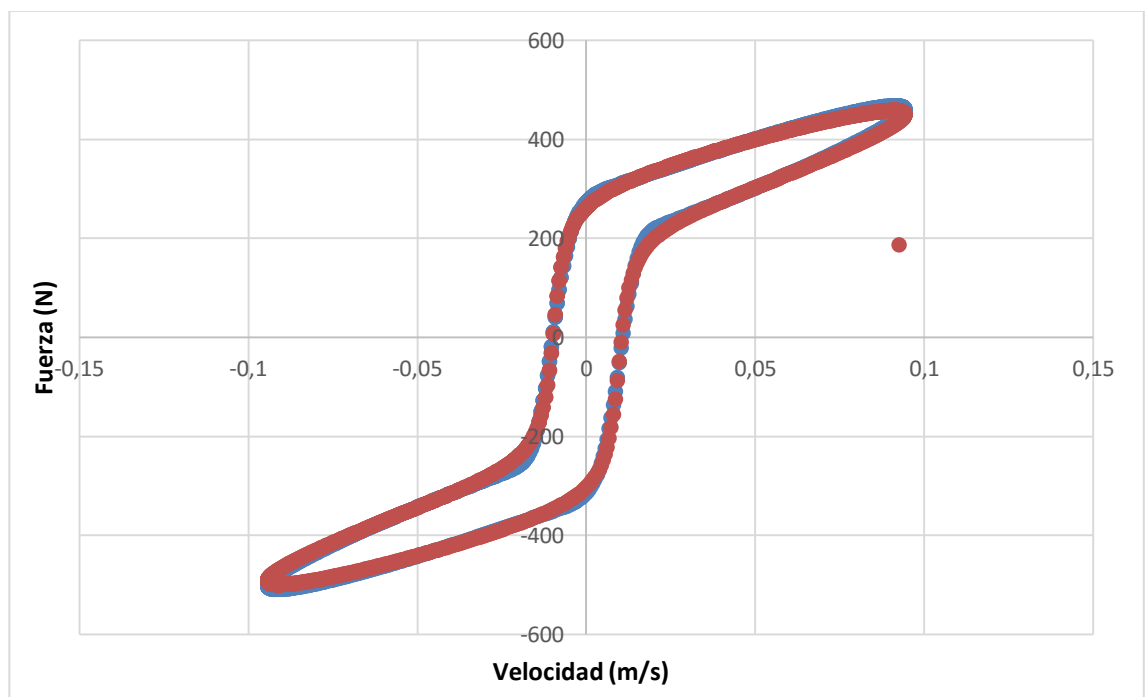
Se debe recordar que el modelo de Bouc-Wen que se usa es dependiente del voltaje (variable representada en las ecuaciones del modelo con una  $v$ ), por lo que la respuestas que ofrece el amortiguador frente a las vibraciones producidas en el vehículo ferroviario por las irregularidades de la vía varían en función del valor de esta variable. Más adelante de este capítulo se muestra como afecta dicha variable en la respuesta del amortiguador magnetorreológico.

En la Tabla 7.2 se presenta de forma resumida el resultado de aplicar numerosas veces el método basado en algoritmos genéticos, de tal forma que para diferentes valores de tensión  $v$  (pero manteniendo siempre iguales los otros trece parámetros del modelo de Bouc-Wen que se fijaron anteriormente de la Tabla 7.1) se muestran al lado los parámetros del modelo de Kwok ajustados a los resultados obtenidos de las simulaciones del modelo de Bouc-Wen.

Datos	c	k	alpha	beta	delta	f0	ECM
Para V=1	2135	3684	174,9	372,9	3,6	-21,2	7,07
Para V=1,5	2913,4	3300	244,9	340	3,4	-20,8	6,92
Para V=2	3802,3	3490,5	303	401,2	4	-21	8,3
Para V=2,5	4500	3385,7	373,3	367,2	3,7	-21,2	9,88
Para V=3	5252,1	3294,3	440,1	363,1	3,6	-21,3	11,78

*Tabla 7.2 – Parámetros de Kwok asemejados a Bouc-Wen*

Para apreciar mejor la precisión del ajuste tras usar algoritmos genéticos para asemejar el modelo de Kwok al de Bouc-Wen dependiente del voltaje, en cada una de las siguientes gráficas (de la Figura 7.5 a la Figura 7.9), se muestran los ciclos de histéresis de ambos modelos una vez ajustados los parámetros de las ecuaciones de Kwok. Como puede apreciarse, los ciclos son muy parecidos, considerándose que la aproximación es buena y adecuada para usar el modelo de Kwok ajustado al de Bouc-Wen en las simulaciones dinámicas del vehículo ferroviario con Simpack.



*Figura 7.3 –Ciclo de histéresis modelo Kwok (rojo) y ciclo de histéresis modelo Bouc-Wen con v=1 (azul)*

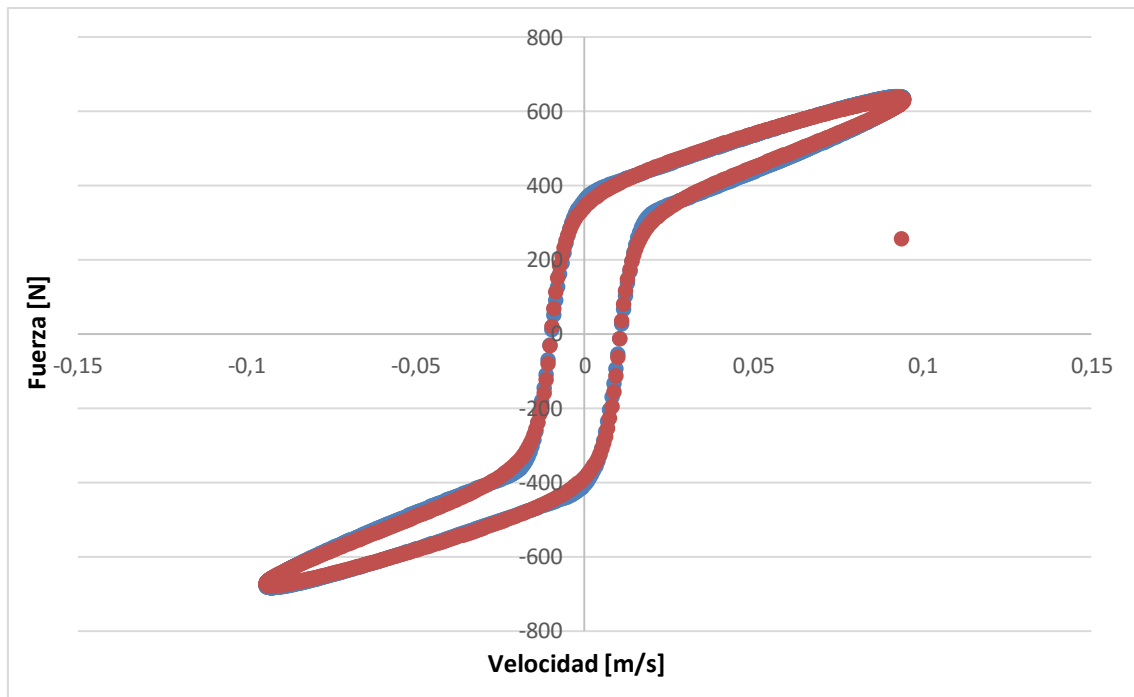


Figura 7.4 – Ciclo de histéresis modelo Kwok (rojo) y ciclo de histéresis modelo Bouc-Wen con  $v=1.5$  (azul)

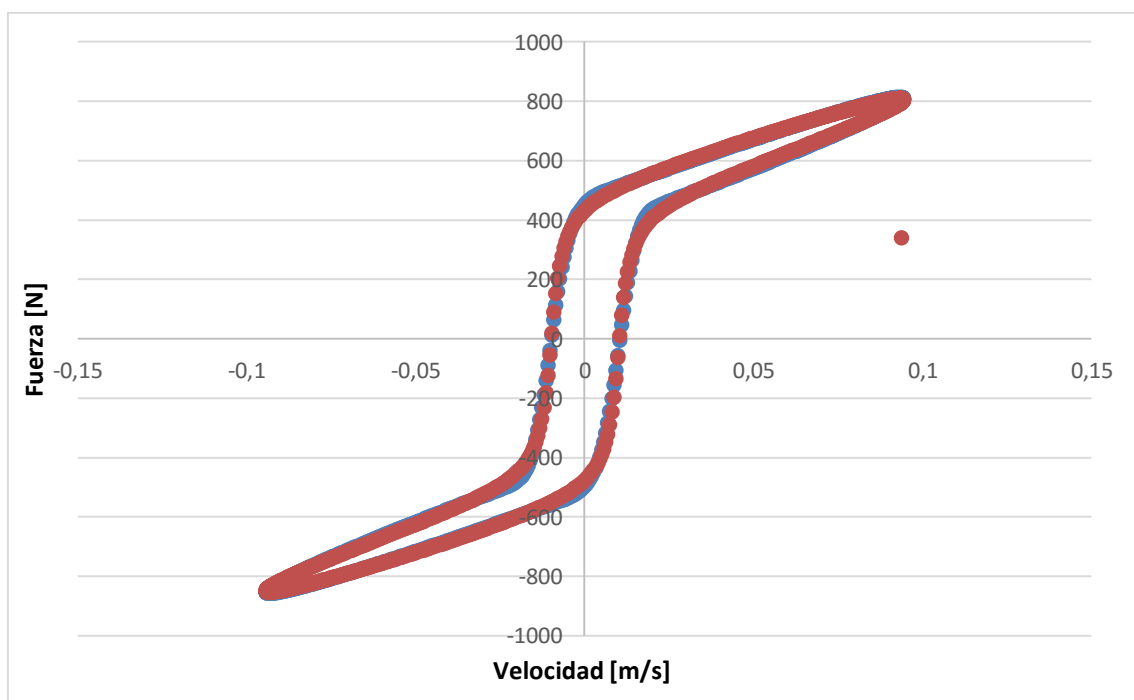


Figura 7.5 – Ciclo de histéresis modelo Kwok (rojo) y ciclo de histéresis modelo Bouc-Wen con  $v=2$  (azul)

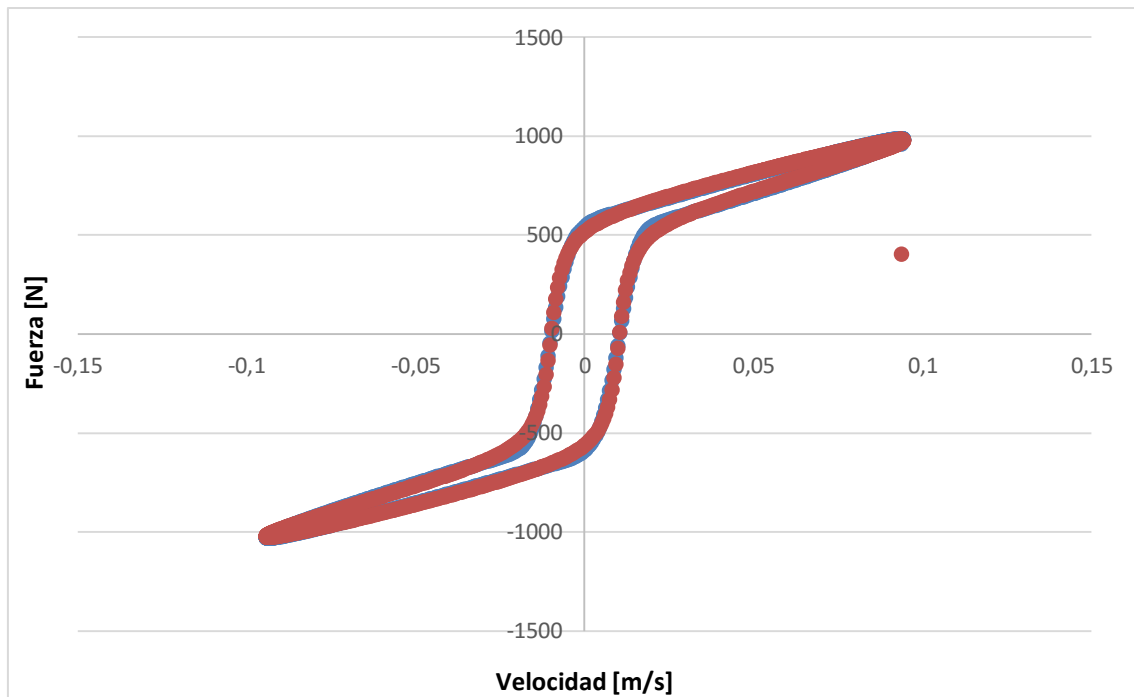


Figura 7.6 – Ciclo de histéresis modelo Kwok (rojo) y ciclo de histéresis modelo Bouc-Wen con  $v=2.5$  (azul)

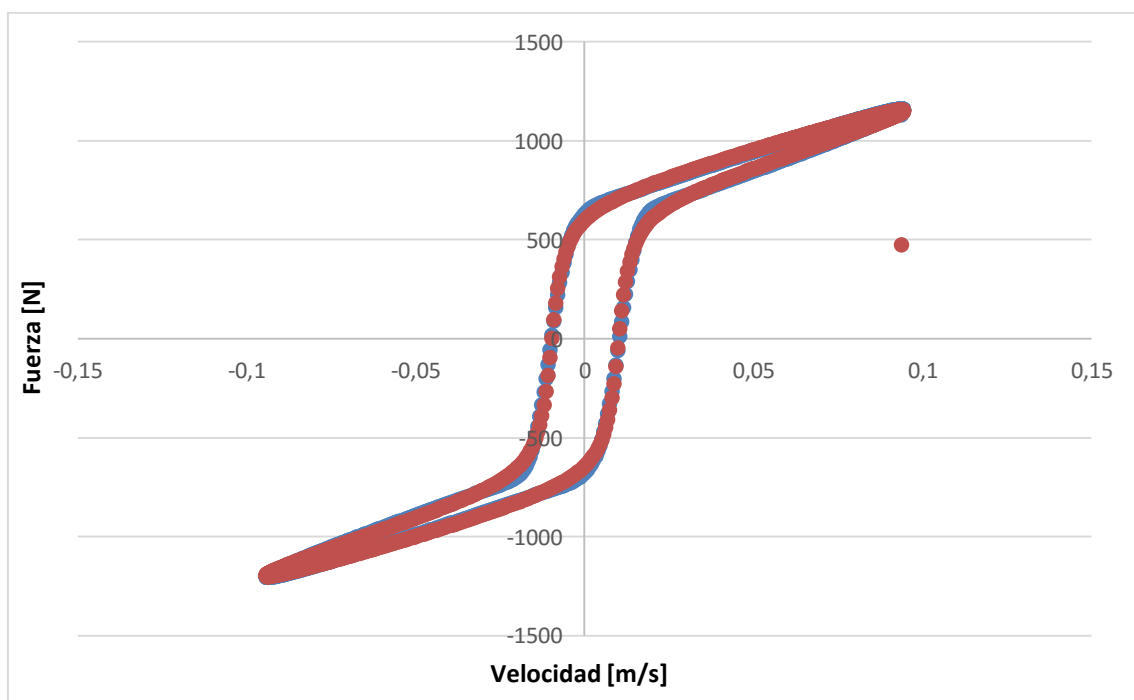


Figura 7.7 – Ciclo de histéresis modelo Kwok (rojo) y ciclo de histéresis modelo Bouc-Wen con  $v=3$  (azul)



Las Figuras 7.8 a la 7.13 tienen como finalidad determinar la relación existente entre cada uno de los parámetros del modelo de Kwok con respecto a la tensión aplicada en el amortiguador magnetorreológico. Los datos de los que se han extraído las gráficas mencionadas pueden verse en la Tabla 7.2.

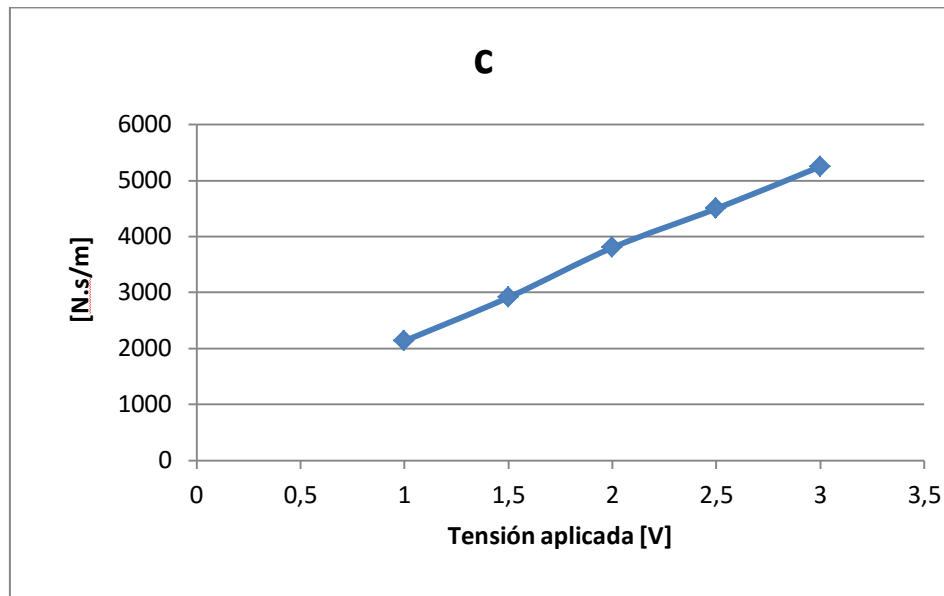


Figura 7.8 – Evolución del parámetro  $c$  de las ecuaciones de Kwok al modificar la variable  $v$  de las ecuaciones de Bouc-Wen

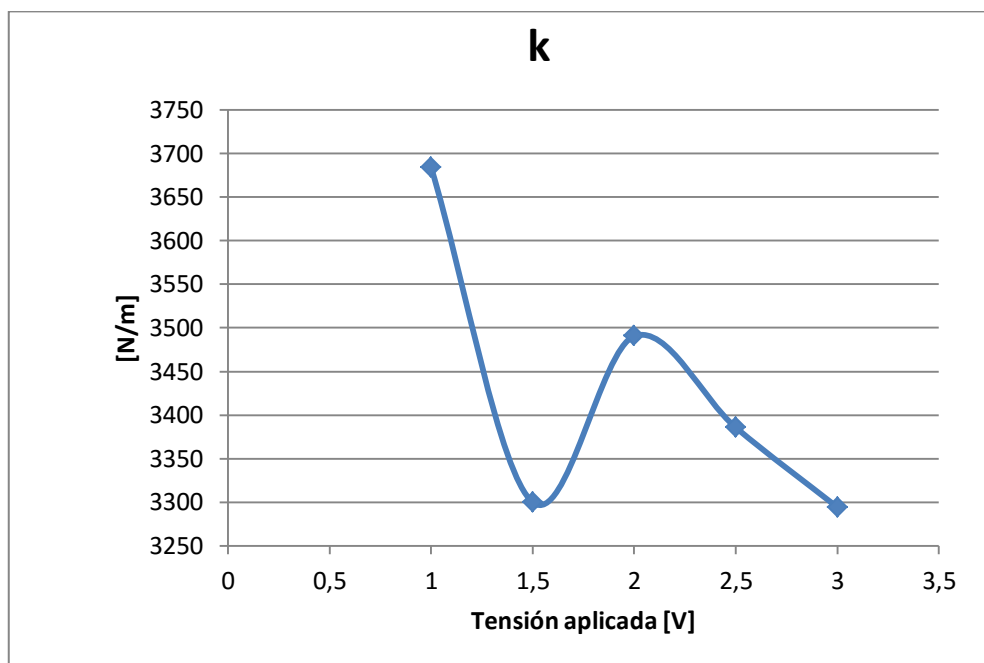


Figura 7.9 – Evolución del parámetro  $K$  de las ecuaciones de Kwok al modificar la variable  $v$  de las ecuaciones de Bouc-Wen

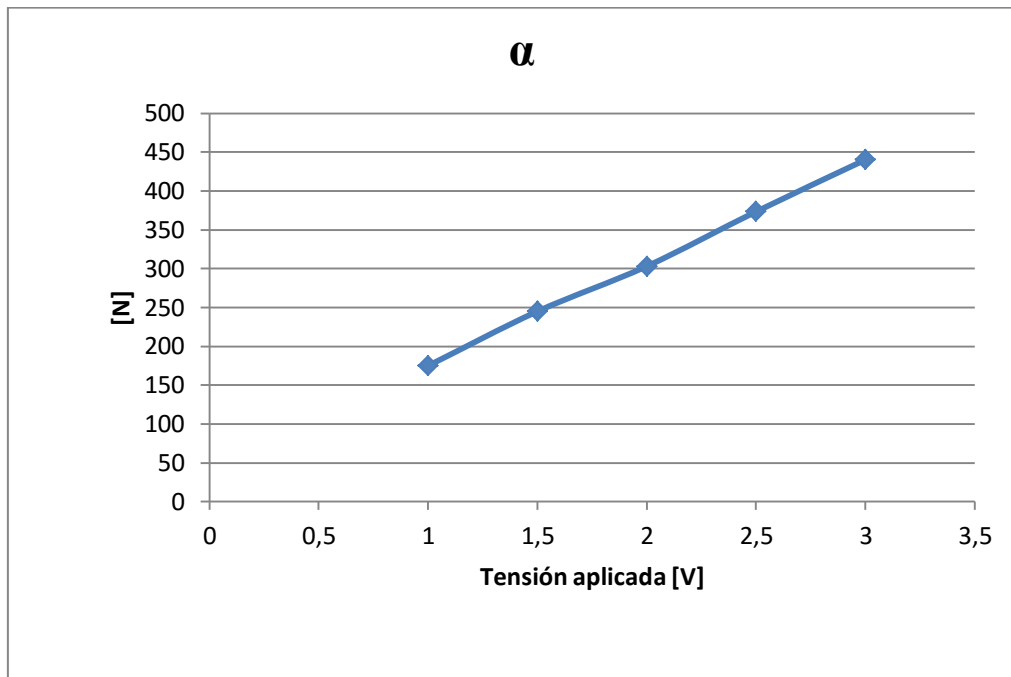


Figura 7.10 – Evolución del parámetro  $\alpha$  de las ecuaciones de Kwok al modificar la variable  $v$  de las ecuaciones de Bouc-Wen

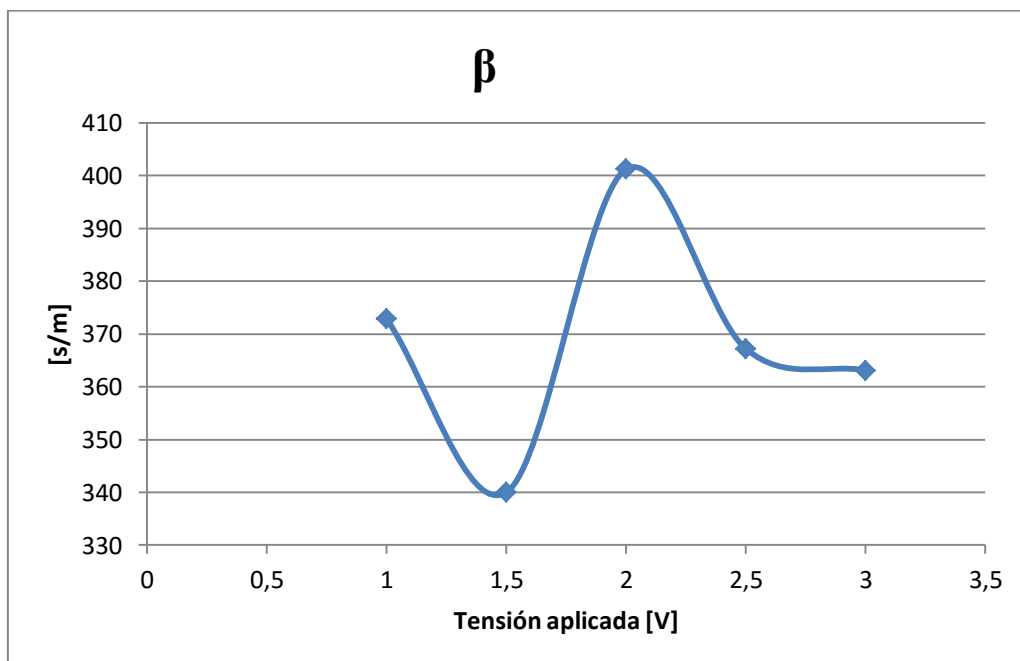


Figura 7.11 – Evolución del parámetro  $\beta$  de las ecuaciones de Kwok al modificar la variable  $v$  de las ecuaciones de Bouc-Wen

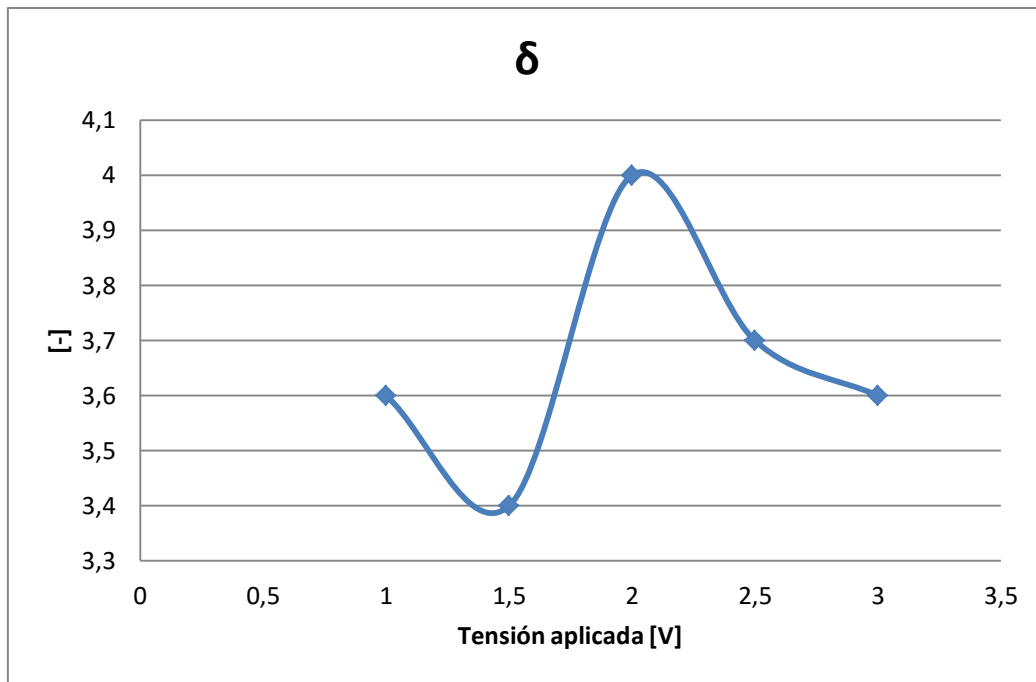


Figura 7.12 – Evolución del parámetro  $\delta$  de las ecuaciones de Kwok al modificar la variable  $v$  de las ecuaciones de Bouc-Wen

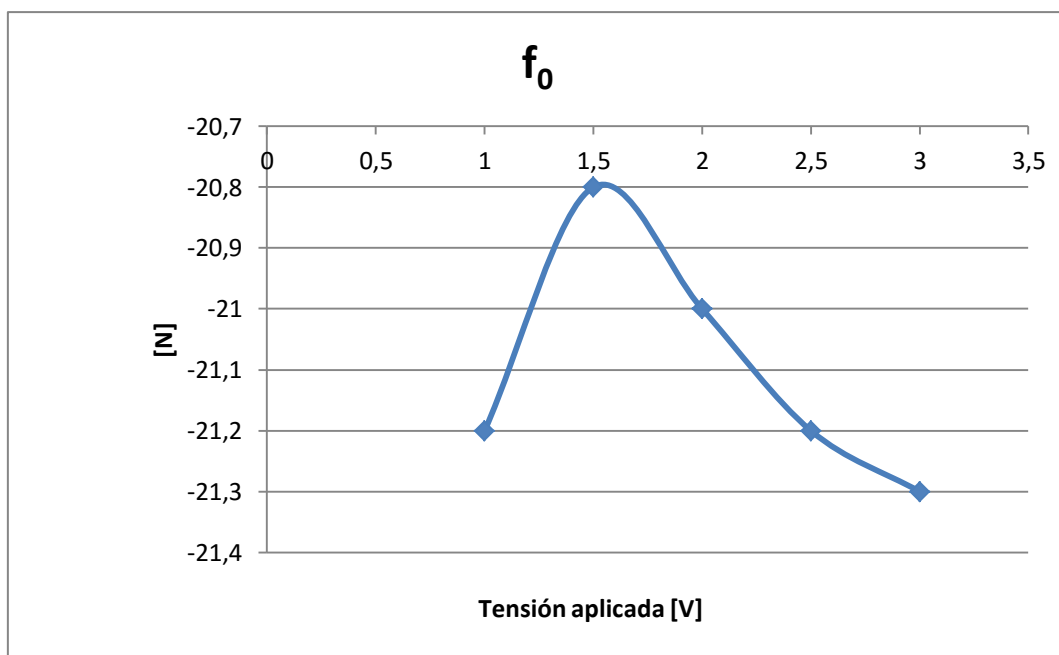


Figura 7.13 – Evolución del parámetro  $f_0$  de las ecuaciones de Kwok al modificar la variable  $v$  de las ecuaciones de Bouc-Wen

Los polinomios de ajuste de los parámetros de Kwok en función de la tensión aplicada al amortiguador magnetorreológico pertenecientes a las gráficas recientemente mostradas (Figura 7.8 a Figura 7.13) son los siguientes:

$$c = 1564.2v + 592.2 \quad (1)$$

$$k = 786v^4 - 6659v^3 + 20313v^2 - 26303v + 15547 \quad (2)$$

$$\alpha = 131.76v + 43.72 \quad (3)$$

$$\beta = 209.6v^4 - 1719.6v^3 + 5044.4v^2 - 6211.7v + 3050.2 \quad (4)$$

$$\delta = 1.86v^4 - 15.33v^3 + 44.93v^2 - 55.06v + 27.20 \quad (5)$$

$$f_0 = -033v^4 + 3.13v^3 - 10.71v^2 + 15.41v - 28.70 \quad (6)$$

donde  $v$  es la tensión aplicada al amortiguador magnetorreológico.

La mayoría de los parámetros pueden ser ajustados usando un polinomio de cuarto orden, como es el caso de los parámetros  $k$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  y  $f_0$ . En cambio la relación de los parámetros  $c$  y  $\alpha$  con la tensión aplicada al amortiguador magnetorreológico es lineal. Fijando la atención en las gráficas correspondientes a los parámetros  $\beta$  y  $\delta$  (Figuras 7.13 y 7.14), ambas parecen tener el mismo comportamiento al cambiar el valor de  $v$ , haciendo pensar que es razonable la existencia de cierta relación entre los dos parámetros, de la que se podría decir que el parámetro  $\delta$  es aproximadamente cien veces menor que  $\beta$ . Finalmente, del resto de parámetros del modelo de Kwok ( $K$  y  $f_0$ ), se podría decir que no existe ninguna tendencia clara en la evolución de los mismos al modificar el valor de la tensión, tal vez si contáramos un número elevado de casos se podría encontrar algún tipo de relación adicional.

Ya se puede comenzar con las simulaciones dinámicas del modelo modificado del tren en Simpack. Las Figuras 7.14 a la 7.16 han sido obtenidas a partir de las simulaciones dinámicas del vehículo ferroviario y visualizadas mediante el post-procesador de Simpack. Estas gráficas representan la fuerza que está ejerciendo el amortiguador en dirección perpendicular al plano de la vía por la que circula el tren en función del tiempo, en definitiva, se está mostrando la respuesta del amortiguador frente a las diferentes irregularidades de la vía. Sólo se mostrará la respuesta de uno de los amortiguadores que componen la suspensión secundaria del tren y obviamente que rijan su comportamiento por el modelo de Kwok, pero en todos los casos siempre se muestra la gráfica correspondiente al mismo amortiguador, para poder realizar posteriormente una comparativa de los resultados.

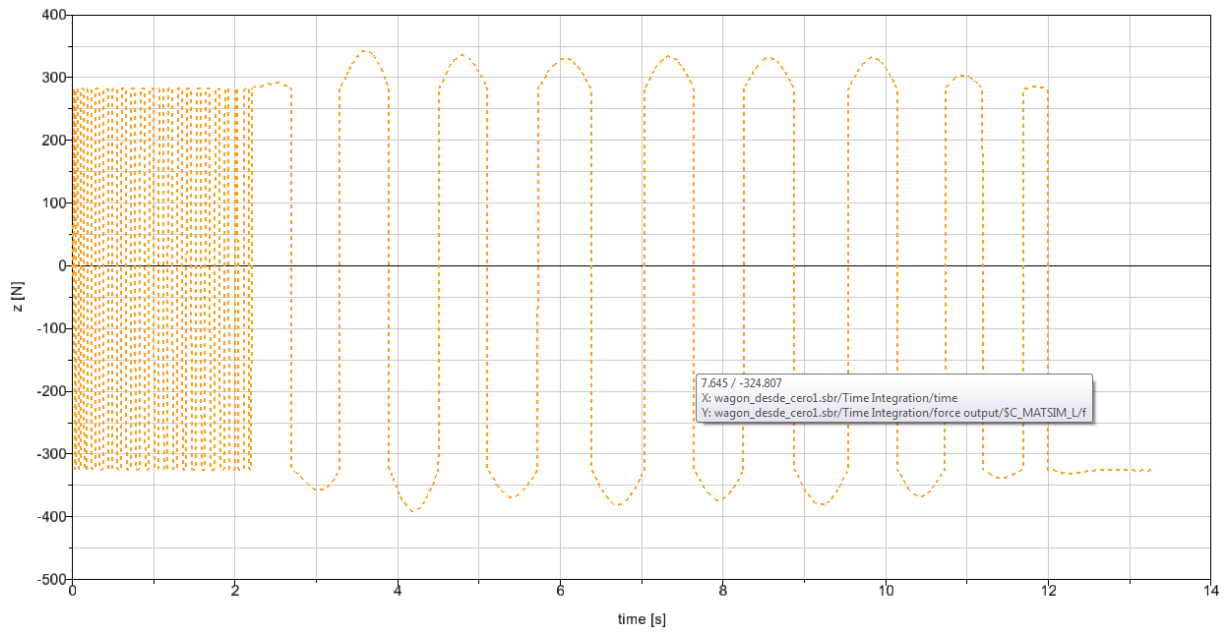


Figura 7.14 – Respuesta del amortiguador con el modelo de Kwok ajustado al modelo de Bouc-Wen con  $v=2$

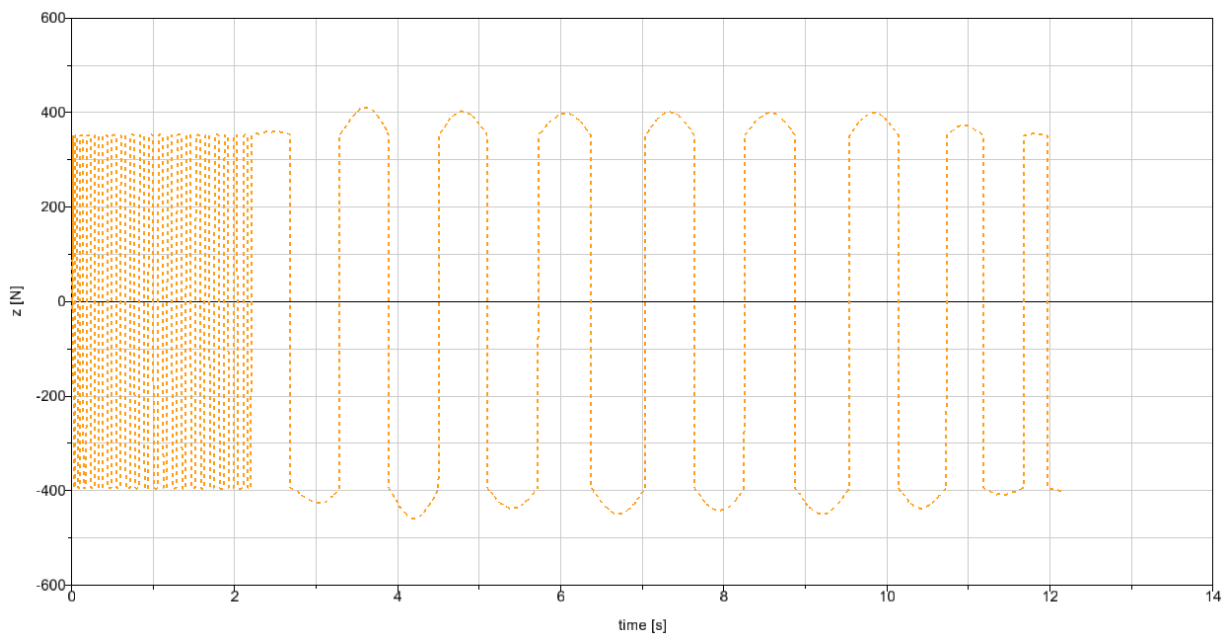
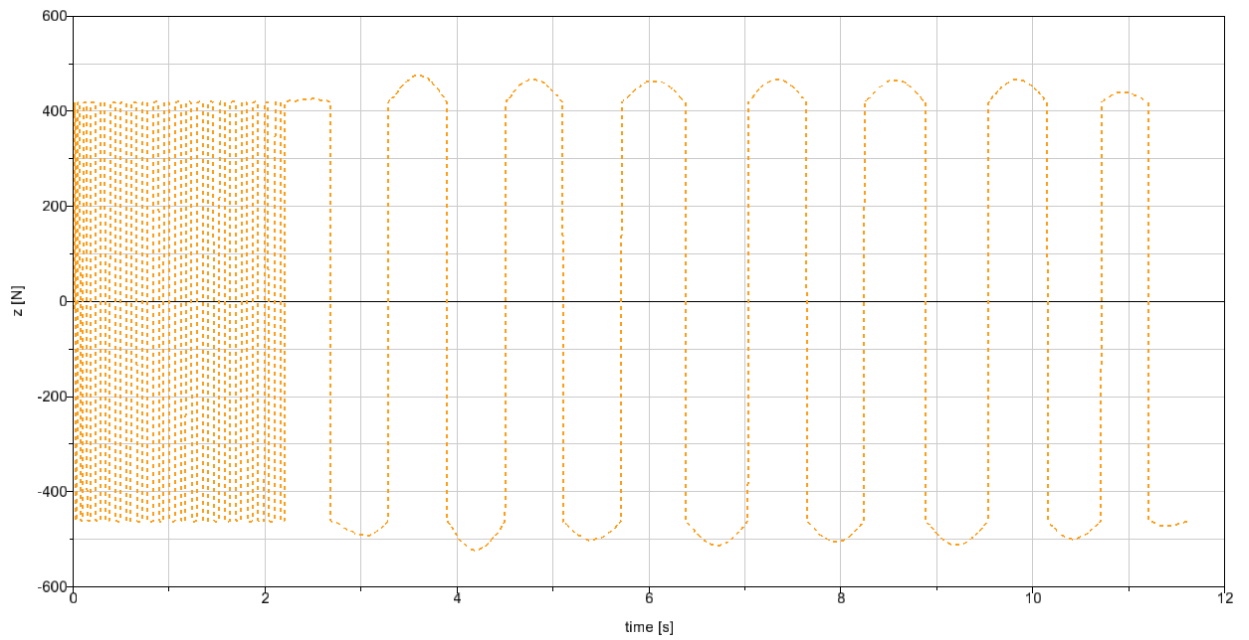


Figura 7.15 - Respuesta del amortiguador con el modelo de Kwok ajustado al modelo de Bouc-Wen con  $v=2.5$



*Figura 7.16 - Respuesta del amortiguador con el modelo de Kwok ajustado al modelo de Bouc-Wen con  $v=3$*

Como puede apreciarse en las gráficas, es muy clara la relación existente entre la variable  $v$  y la fuerza que ejerce el amortiguador, al aumentar el valor de  $v$  la fuerza también aumenta.

## 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

### 8.1 CONCLUSIONES

En este proyecto se ha realizado el estudio del comportamiento de un vehículo ferroviario equipado con suspensión secundaria semi-activa basada en amortiguadores magnetorreológicos. Para realizar este estudio se ha modelado un vehículo ferroviario en Simpack y se ha llevado a cabo una serie de simulaciones dinámicas de las que se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El análisis de los resultados de las simulaciones arrojados por Simpack son coherentes y no presentan anomalías, dando validez a los mismos y a la obtención de otras conclusiones.
- Es perfectamente posible el uso de técnicas de optimización basadas en algoritmos genéticos para asemejar el modelo de amortiguación de Kwok al de Bouc-Wen.
- Implementar las ecuaciones del modelo de Bouc-Wen dependiente del voltaje en las simulaciones de un vehículo ferroviario modelado con Simpack da problemas. Para que Simpack pueda calcular las simulaciones, es necesario recurrir al modelo de Kwok, cuyas ecuaciones no son diferenciales y no dan problemas al resolverlas con Simpack.
- Este proyecto servirá como base para trabajos futuros acerca del comportamiento de los vehículos ferroviarios y mejora de la calidad de marcha y confort de los mismos.

## 8.2 TRABAJOS FUTUROS

A la vista de los resultados obtenidos con el presente proyecto fin de carrera, se proponen los trabajos futuros siguientes:

- Realizar más simulaciones variando los parámetros del modelo de Bouc-Wen utilizados, analizando cómo afecta su modificación a la respuesta de los amortiguadores.
- Comprobar si se pueden asemejar entre sí otros modelos de amortiguación basados en fluidos magnetorreológicos (distintos al modelo de Kwok y el de Bouc-Wen) mediante métodos basados en algoritmos genéticos.
- Implementar en las simulaciones un controlador que proporcione la mejor respuesta en cada momento a los amortiguadores en función de las condiciones de la vía, velocidad del vehículo ferroviario, peso del vehículo, etc.
- Realizar el estudio de una suspensión secundaria activa para determinar las posibles ventajas e inconvenientes de los sistemas de suspensión semi-activa frente a los sistemas de suspensión activa.



# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1][http://www.imac.unavarra.es/web\\_imac/pages/docencia/asignaturas/maquinas-iti/Trabajos/Amortiguadores.pdf](http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/maquinas-iti/Trabajos/Amortiguadores.pdf) (acceso septiembre 2014).
- [2] Enrique Martínez López. “Cálculo de resortes helicoidales de compresión”. Universidad Politécnica de Cartagena, 2013.
- [3][http://www.ehowenespanol.com/funciona-barra-torsion-como\\_76411/](http://www.ehowenespanol.com/funciona-barra-torsion-como_76411/)(acceso septiembre 2014).
- [4]<http://www.actimat.es/web/magnetoreologicos.asp> (acceso octubre 2014).
- [5]<http://blogdeautomoviles.com/amortiguadores-magnetoreologicos/>(acceso octubre 2014).
- [6]<https://es.scribd.com/doc/225382634/Tipos-de-Amortiguamiento>(acceso octubre 2014).
- [7][http://www.autospeed.com/cms/A\\_112605/article.html](http://www.autospeed.com/cms/A_112605/article.html)(acceso octubre 2014).
- [8] Eva Moratalaz. “Primero de electromecánica de vehículos, circuitos de fluidos, suspensión y dirección. Tema 6: sistemas de suspensión”.
- [9][http://cala.unex.es/cala/epistemowikia/index.php?title=L%C3%B3gica\\_modal\\_\(Versi%C3%B3n\\_1\)](http://cala.unex.es/cala/epistemowikia/index.php?title=L%C3%B3gica_modal_(Versi%C3%B3n_1)) (acceso octubre de 2014).
- [10] Juan Jurado Zurro. Proyecto fin de carrera: “Estudio del Comportamiento Dinámico de un Vehículo Ferroviario Equipado con Suspensión Secundaria Semi-activa Utilizando Lógica Difusa”, 2010.
- [11][http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012056092012000100003&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012056092012000100003&script=sci_arttext) (acceso enero 2015)
- [12]<http://www.talgo.com/index.php/es/pendulacion.php> (acceso febrero 2015)
- [13][http://es.wikipedia.org/wiki/Suspensi%C3%B3n\\_de\\_ballesta](http://es.wikipedia.org/wiki/Suspensi%C3%B3n_de_ballesta)] (acceso febrero 2015)
- [14]<http://www.jost.com.br/es/produtos-jost/levante-neumatico-para-suspension-neumatica> (acceso febrero 2015).
- [15]<http://www.sabelotodo.org/automovil/suspension.html> (acceso febrero 2015).

- [16]<https://sites.google.com/site/suspensiones11danimarc/3-9-el-amortiguador> (acceso febrero 2015).
- [17]<http://spanish.alibaba.com/product-gs/guangzhou-xiongfeng-hydraulic-damper-213847839.html> (acceso febrero 2015).
- [18]<http://www.surisa.es/helicoidalestampacion.html> (acceso febrero 2015).
- [19]<https://www.youtube.com/watch?v=bgxqJXR03rM> (acceso febrero 2015).
- [20]<http://www.aficionadosalamecanica.net/sistema-esp.htm> (acceso febrero 2015).
- [21]<http://www.monografias.com/trabajos72/diagrama-esfuerzo-deformacion/diagrama-esfuerzo-deformacion.shtml> (acceso marzo 2015).
- [22]<http://es.wikipedia.org/wiki/Reolog%C3%ADa> (acceso marzo 2015).
- [23]César D. Mesquida, Jorge L. Lässig. "Introducción a los fluidos magnetoreológicos con aplicaciones en ingeniería". Universidad Nacional del Comahue, 2011.
- [24]Miguel Cupich Rodríguez, Fernando J. Elizondo Garza "Amortiguadores Magnetorreológicos". Ingenierías, Julio-Diciembre 1998, Vol 1, No 2.
- [25]<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/115833-Propiedades-y-aplicaciones-de-los-fluidos-magnetoreologicos.html> (acceso marzo 2015)
- [26]<http://www.todotren.com.ar/trenes/x2000.htm> (acceso marzo 2015)
- [27]<http://www.todotren.com.ar/trenes/pendo1.htm> (acceso marzo 2015)
- [28]<http://www.caf.es/es/innovacion-tecnologia/productos-tecnologicos/sibi.php> (acceso marzo 2015)
- [29]I. Sahin, T. Engin. "Comparison of some existing parametric models for magnetorheological fluid dampers". Universidad de Sakarya, Tükía, 2010.
- [30] SIMPACK Release 9.7. "Simpack Documentacion". 2001-2014.
- [31]<http://eddyalfaro.galeon.com/geneticos.html> (acceso marzo 2016)
- [32]Wang y Liao. "Semi-active suspension systems for railway vehicles using magnetorheological dampers. Part I: system integration and modelling", Taylor & Francis, 2011
- [33]Wang y Liao. "Semi-active suspension systems for railway vehicles using magnetorheological dampers. Part II: simulation and analysis", Taylor & Francis, 2011.
- [34] B.F. Spencer Jr., S.J. Dyke, M.K. Sain y J.D. Carlson. "Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction", Agosto de 1996.

- [35] Glen A. Dimock, Jin-Hyeong Yoo y Norman M. Wereley. "Quasi-steady Bingham Biplastic Analysis of Electrorheological and Magnetorheological Dampers", Noviembre de 2002.
- [36] H. Metered, P. Bonello y S. Oyadiji. "Nonparametric Identification Modeling of Magnetorheological Damper Using Chebyshev Polynomials Fits", Octubre de 2009.
- [37] Chih-Chen Chang. "Neural Network Modeling of a Magnetorheological Damper", Septiembre de 1998.
- [38] Lu-Hang Zonga, Xing-Long Gonga, Chao-Yang Guoa y Shou-Hu Xuana. "Inverse neuro-fuzzy MR damper model and its application in vibration control of vehicle suspension system", Diciembre de 2011.